



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio y Simulación de un STATCOM conectado a una red

Autor : Jesús López Merino

Tutor : Miguel Eduardo Montilla D'Jesús

Leganés, Octubre de 2016

Resumen

El objetivo del actual proyecto es el análisis del compensador estático síncrono (STATCOM), el cual es una de las aplicaciones de electrónica de potencia más importante dentro de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS, flexible alternative current transmission system).

En los últimos años, se han desarrollado muchas investigaciones sobre el STATCOM en numerosas publicaciones de artículos e informes técnicos. Por lo tanto, ser capaz de adquirir un profundo conocimiento sobre esta materia es una tarea ardua y compleja. Este trabajo presenta una útil recopilación de la información encontrada sobre este tema, para ser utilizado por futuros alumnos e investigadores interesados en la materia.

STATCOM es un dispositivo de electrónica de potencia compuesto de un convertidor en fuente de tensión, el cual está conectado en paralelo al sistema de transmisión de corriente alterna. El trabajo proporciona una visión del conjunto de parámetros del control y modelado de las principales aplicaciones del STATCOM para solucionar los problemas de calidad de la energía. En concreto, la regulación de la tensión de la carga y la corrección del factor de potencia mediante el intercambio de potencia reactiva con la red son analizados en detalle.

El control del sistema para la compensación de potencia reactiva ha sido implementado con una serie de reguladores PI ajustados, los cuales posibilitan el control de la tensión DC, la corrección del factor de potencia y el control de la tensión de alterna de manera eficiente.

Para concluir, los resultados y simulaciones finales del diseño implementado en Matlab/Simulink han sido analizados para demostrar su eficacia en la mejora de los escenarios planteados.

Abstract

The aim of this project is the analysis of the so called, STATic synchronous COMpensator (STATCOM), which is one of the most important power electronics applications in the field of flexible alternating current transmission system (FACTS).

In recent times, several researches about STATCOM have been developed resulting in numerous publications in journals and technical reports. Therefore to be able to acquire a deep knowledge on this subject is an arduous and complicated task. This work presents a useful collection of the most important pieces of information found about this topic, to be used by future students and researchers interested in the subject.

STATCOM is a power-electronics device composed of a voltage source converter (VSC), which is shunt connected to the alternating current electricity transmission. This project provides an overview of the modelling and control requirements of the main STATCOM applications so that to solve the energy quality problems. In particular, load voltage regulation and power factor correction by means of the reactive power exchange with the network is discussed in detail.

The control of the system for the reactive power compensation has been implemented as a cascade tuned PI-controller, which offers the DC bus voltage control, power factor correction and the AC voltage control in an efficient manner.

To conclude, the final results and simulations of the implemented design in Matlab/Simulink have been analysed to verify the improvement in the effectiveness of the proposed cases.

Índice general

	Página
Resumen	I
Abstract	II
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	IX
Lista de Acrónimos	X
1 Introducción	1
1.1 Situación actual	2
1.2 Problemática	3
1.3 Objetivo del trabajo	5
1.4 Estructura del documento	6
2 Estado del arte	7
2.1 Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna, FACTS	8
2.2 Compensador estático síncrono, STATCOM	10
2.2.1 Características de operación del STATCOM	12
2.2.2 Régimen permanente del STATCOM	18
2.2.3 Descripción del sistema de estudio	20
2.3 Configuración del STATCOM	21
2.3.1 Convertidor trifásico	21
2.3.2 Dispositivos de conmutación	24
2.3.3 Técnicas de modulación	25
2.3.4 Dimensionamiento del STATCOM	28
3 Modelado y Control vectorial del STATCOM	34
3.1 Transformación al sistema de referencia d-q-o	36
3.2 Lazo de seguimiento de fase, PLL	38
3.3 Ecuaciones de la planta del sistema	38
3.4 Implementación de los límites físicos	41
3.5 Reguladores PI	44
3.6 Ajuste de los reguladores del control	45
3.6.1 Lazo de intensidad	45

3.6.2	Lazo de potencia reactiva	50
3.6.3	Lazo de tensión eficaz del PCC	53
3.6.4	Lazo de tensión en la etapa de continua	55
3.7	Anti-windup para reguladores PI	59
3.8	Implementación del SPWM	63
4	Resultados de la Simulación	68
4.1	STATCOM como regulador de tensión	70
4.1.1	Primer caso	70
4.1.2	Segundo caso	74
4.1.3	Tercer caso	77
4.1.4	Cuarto caso	80
4.2	STATCOM como corrector del factor de potencia	83
4.2.1	Primer caso	83
4.2.2	Segundo caso	88
4.2.3	Tercer caso	90
4.2.4	Cuarto caso	94
5	Conclusión	97
5.1	Objetivos cumplidos	97
5.2	Posibles mejoras del modelo presentado	97
5.3	Trabajos futuros	99
6	Presupuesto	100
6.1	Presupuesto personal.	100
6.2	Análisis económico de la inversión	103
7	Planificación del proyecto	106
	Bibliografía	111
	Apéndices	112
A	Datos técnicos del sistema Benchmark analizado	113
B	Valores base	114
C	Transformación al sistema de referencia d-q-o	115
D	Lazo de seguimiento de fase, PLL	120

Índice de figuras

Figura 1.1	Información general del STATCOM	2
Figura 2.1	SVC para estabilizar un sistema de transmisión de 735 kV en Chénier, Canada	8
Figura 2.2	Dos TCSC instalados por PGCIL (Power Grid Corporation of India Ltd)	10
Figura 2.3	STATCOM	11
Figura 2.4	Comparativa de la actuación del STATCOM y el SVC	12
Figura 2.5	Diagrama fasorial con una carga puramente resistiva	13
Figura 2.6	Diagrama fasorial con una carga puramente reactiva	13
Figura 2.7	Diagrama fasorial con una carga puramente capacitiva	14
Figura 2.8	Relación entre la tensión e intensidad	15
Figura 2.9	Diagrama fasorial de las intensidades, en el modo de corrección del factor de potencia	16
Figura 2.10	Operación del convertidor en fuente de tensión (VSC)	17
Figura 2.11	Representación esquemática de un convertidor en fuente de tensión, conectado a la red mediante un transformador en serie	18
Figura 2.12	Representación esquemática de un STATCOM conectado a la red	19
Figura 2.13	Ejemplos de topologías del convertidor de dos niveles	22
Figura 2.14	Convertidor trifásico	23
Figura 2.15	Clase de semiconductor totalmente controlado idóneo, en función del nivel de potencia y frecuencia del convertidor	24
Figura 2.16	Clases de señales portadoras	26
Figura 2.17	Modulación bipolar	27
Figura 2.18	Sobremodulación	28
Figura 2.19	Circuito equivalente monofásico para la tensión de salida del inversor	29
Figura 2.20	Región de operación del convertidor	31
Figura 2.21	Influencia de la tensión del condensador en la potencia reactiva máxima proporcionada por el inversor	32
Figura 2.22	Influencia de la reactancia equivalente de los elementos empleados en la conexión al PCC en la potencia reactiva máxima proporcionada por el inversor	33
Figura 3.1	Esquema del caso de estudio	35
Figura 3.2	Esquema general del control del STATCOM	36
Figura 3.3	Representación de los fasores del sistema en el plano $\alpha - \beta$ y en el plano d-q	37
Figura 3.4	Bloques del esquema general del control del STATCOM	38

Figura 3.5	Esquema del circuito general implementado en Simulink	39
Figura 3.6	Explicación de la representación de los acoplamientos en Simulink .	40
Figura 3.7	Implementación de la etapa de continua (DC) en Simulink	41
Figura 3.8	Bloque explicativo del regulador PID	44
Figura 3.9	Regulador PI de la intensidad	48
Figura 3.10	Respuesta del regulador PI de la intensidad, ante un cambio de consigna en i_q	49
Figura 3.11	Respuesta del regulador PI de la intensidad, ante un cambio de consigna en i_d	49
Figura 3.12	Regulador PI de la potencia reactiva	51
Figura 3.13	Respuesta del regulador PI de la potencia reactiva	52
Figura 3.14	Regulador PI del valor eficaz de la tensión del punto de acople a la red	54
Figura 3.15	Respuesta del regulador PI del valor eficaz de la tensión del PCC .	55
Figura 3.16	Implementación del regulador de la tensión de la etapa de continua	58
Figura 3.17	Respuesta del regulador PI de la tensión de la etapa de continua . .	58
Figura 3.18	Potencia activa del convertidor, generada por la respuesta del regulador PI de la tensión de la etapa de continua	59
Figura 3.19	Esquema general del fenómeno de la saturación	60
Figura 3.20	Esquema general del regulador PI, donde se estudia el efecto del windup	60
Figura 3.21	Ejemplo ilustrativo del fenómeno del windup	61
Figura 3.22	Efecto del windup en las potencias suministradas por el convertidor	62
Figura 3.23	Esquema del tipo de anti-windup empleado en los reguladores PI .	63
Figura 3.24	Representación esquemática del sistema general con el convertidor real	64
Figura 3.25	Representación de la técnica de modulación SPWM	64
Figura 3.26	Implementación general del bloque SPWM	65
Figura 3.27	Efecto del filtro pasivo en la eliminación de los armónicos	66
Figura 3.28	Influencia de la modulación en la tensión de la etapa de continua (V_{DC})	67
Figura 4.1	Caso de estudio	69
Figura 4.2	Demostración de la actuación eficiente del STATCOM	71
Figura 4.3	Comparación de la intensidad suministrada por el STATCOM y la tensión en el PCC	71
Figura 4.4	Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STAT- COM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad	72
Figura 4.5	Comparación de la regulación de la tensión del PCC por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad	72
Figura 4.6	Intensidades proporcionadas por el STATCOM a la red, conside- rando exclusivamente el límite de la intensidad	73

Figura 4.7	Comparación de la potencia activa suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad	73
Figura 4.8	Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	74
Figura 4.9	Comparación de la regulación de la tensión del PCC por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	75
Figura 4.10	Comparación de la intensidad proporcionada por el STATCOM al PCC, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	76
Figura 4.11	Índice de modulación del STATCOM, considerando el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	76
Figura 4.12	Regulación de la tensión del punto de conexión a la red por el STATCOM, considerando sus límites físicos	77
Figura 4.13	Potencia reactiva suministrada por el STATCOM, considerando sus límites físicos	78
Figura 4.14	Potencia reactiva suministrada por el STATCOM tras la actuación del filtro, considerando sus límites físicos	78
Figura 4.15	Porcentaje de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM que se pierde en el filtro	79
Figura 4.16	Magnitud de la intensidad que circula entre el PCC y el STATCOM	80
Figura 4.17	Potencias absorbida por el STATCOM, considerando sus límites físicos	81
Figura 4.18	Comparación de la intensidad y la tensión en el PCC	81
Figura 4.19	Magnitud de la tensión del PCC por la actuación del STATCOM, considerando sus límites físicos	82
Figura 4.20	Intensidad que circula entre el PCC y el STATCOM, considerando sus límites físicos	82
Figura 4.21	Demostración de la actuación eficiente del STATCOM, como corrector del factor de potencia	84
Figura 4.22	Efecto del filtro en la potencia del generador	85
Figura 4.23	Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad	86
Figura 4.24	Comparación de la potencia activa suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad	87
Figura 4.25	Intensidades proporcionadas por el STATCOM a la red, considerando exclusivamente el límite de la intensidad	87
Figura 4.26	Factor de potencia proporcionado por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	88

Figura 4.27	Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	89
Figura 4.28	Comparación de la potencia activa suministrada por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor	89
Figura 4.29	Índice de modulación del STATCOM, considerando ambos límites físicos	90
Figura 4.30	Factor de potencia proporcionado por el STATCOM, considerando sus límites físicos	91
Figura 4.31	Potencias suministradas por el STATCOM, considerando sus límites físicos	92
Figura 4.32	Potencias suministradas por el STATCOM tras la actuación del filtro, considerando sus límites físicos	92
Figura 4.33	Porcentaje de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM que se pierde en el filtro	93
Figura 4.34	Magnitud de la intensidad que circula entre el punto de conexión a la red y el STATCOM	93
Figura 4.35	Potencias suministradas por el STATCOM, considerando sus límites físicos	94
Figura 4.36	Efecto de corregir el factor de potencia, en la actuación del generador	96
Figura C.1	Sistema de coordenadas α - β - γ y d-q-z	118
Figura D.1	Modelo esquemático de un PLL	121

Índice de tablas

Tabla 1.1	Estimación del número de dispositivos FACTS en el mundo y su potencia total instalada	3
Tabla 1.2	Desarrollo histórico del STATCOM	4
Tabla 2.1	Modo de actuación de los FACTS, ante problemas del sistema eléctrico	9
Tabla 3.1	Límites de la intensidad de circulación y la tensión de salida del convertidor.	43
Tabla 3.2	Parámetros del regulador PI de la intensidad	48
Tabla 3.3	Parámetros del regulador PI de la potencia reactiva.	52
Tabla 3.4	Parámetros del regulador PI de la tensión eficaz del punto de conexión a la red	54
Tabla 3.5	Parámetros del regulador PI de la tensión de la etapa de continua	57
Tabla 4.1	Caso 1, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red	70
Tabla 4.2	Caso 2, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red	74
Tabla 4.3	Caso 3, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red	77
Tabla 4.4	Caso 4, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red	80
Tabla 4.5	Caso 1, como corrector del factor de potencia	83
Tabla 4.6	Caso 2, como corrector del factor de potencia	88
Tabla 4.7	Caso 3, como corrector del factor de potencia	91
Tabla 4.8	Caso 4, como corrector del factor de potencia	94
Tabla 6.1	Presupuesto personal del proyecto	102
Tabla 6.2	Factura final.	103

Lista de Acrónimos

<i>AC</i>	Corriente alterna (Alternative current)
<i>BJT</i>	Transistor de unión bipolar (Bipolar junction transistor)
<i>CSC</i>	Convertidor en fuente de corriente (Current source converter)
<i>DC</i>	Corriente continua (Direct current)
<i>DSRF</i>	Doble marco de referencia síncrono (Double synchronous-reference frame)
<i>DSTATCOM</i>	Compensador estático en sistemas de distribución (Distribution static compensator)
<i>EPRI</i>	Instituto de investigación de energía eléctrica (Electric power research institute)
<i>FACTS</i>	Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna (Flexible alternating current transmission system)
<i>GTO</i>	Tiristor de apagado por compuerta (Gate turn-off thyristor)
<i>HSRF</i>	Marco de referencia síncrono con armónicos (Harmonic synchronous-reference frame)
<i>IPC</i>	Controlador de potencia de interfase (Inter-phase power controller)
<i>IGBT</i>	Transistor de unión bipolar de puerta aislada (Insulated gate bipolar transistor)
<i>IGCT</i>	Tiristor controlado por puerta integrada (Integrated gate commutated thyristor)
<i>MCT</i>	Tiristor controlado por MOS (MOS – Controlled Thyristor)
<i>MOFSET</i>	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor)
<i>PCC</i>	Punto de conexión común (Point of common coupling)
<i>PLL</i>	Lazo de seguimiento de fase (Phase-locked loop)

<i>PQ</i>	Barra de carga (Load bus)
<i>PV</i>	Barra de generación (Generator bus)
<i>PWM</i>	Modulación por ancho de pulso (Pulse width modulation)
<i>SPWM</i>	Modulación sinusoidal por ancho de pulso (Sinusoidal pulse width modulation)
<i>SRF</i>	Marco de referencia síncrono (Synchronous-reference frame)
<i>STATCOM</i>	Compensador estático síncrono (Static synchronous compensator)
<i>SVC</i>	Compensador estático de potencia reactiva (Static VAr compensator)
<i>SVM</i>	Modulación vectorial (Space vector modulator)
<i>TCSC</i>	Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (Thyristor-switched series capacitor)
<i>THD</i>	Distorsión armónica total (Total harmonic distortion)
<i>UPFC</i>	Controlador unificado de flujo de energía (Unified power-flow controller)
<i>VAN</i>	Valor Actual Neto
<i>VSC</i>	Convertidor en fuente de tensión (Voltage source converter)

Capítulo 1

Introducción

La industria del suministro eléctrico está sufriendo una profunda transformación mundial debido a que el mercado se orienta hacia fuentes de energía renovables y la demanda energética está en constante aumento. En dicho contexto, la expansión de las instalaciones está siendo frustrada en muchas ocasiones por las exigencias medioambientales, el uso del suelo y las presiones reguladoras, todas estas barreras evitan la concesión de licencias de construcción de nuevas líneas de transmisión y plantas de generación. Una de las opciones disponibles para gestionar y maximizar los recursos de transmisión ya existentes, con elevados niveles de seguridad y estabilidad, es la utilización de los sistemas flexibles de transmisión de alterna (FACTS) [1].

En los últimos tiempos los dispositivos FACTS son ampliamente conocidos, por su elevada capacidad de control del sistema eléctrico. La significativa rapidez de respuesta de los FACTS es uno de sus progresos más relevantes, la cual permite una mejora notable en las ondas de tensión e intensidad, reaccionando en periodos de tiempo muy cortos con respuestas idóneas en estado estacionario o incluso en condiciones de transitorio. Además de la ventajosa dinámica de estos dispositivos, si se analiza factores estáticos tales como las pérdidas mecánicas, también existen beneficios [2].

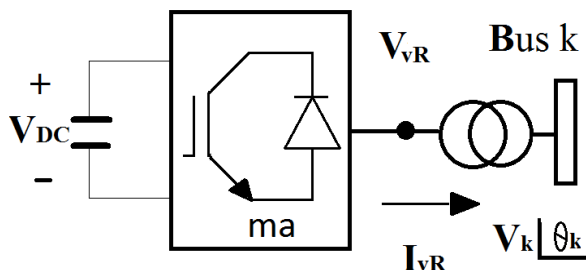
Uno de los dispositivos FACTS de nueva generación que emplea algunos de los desarrollos electrónicos más recientes es el compensador estático síncrono de potencia reactiva (STATCOM), representado en la Figura 1.1. Dicho dispositivo presenta un funcionamiento más complejo y un control más amplio, con la finalidad de actuar como un compensador de potencia reactiva de una serie de cargas eléctricas. El resultado generado por fenómenos circunstanciales que provocan variaciones de la tensión, las cuales llegan a ser muy pronunciadas e inadmisibles, es un problema que un compensador de potencia puede resolver eficazmente [2].

El objeto de estudio de este proyecto es la configuración y modo de operación de dicho dispositivo (STATCOM) en los sistemas de distribución de media tensión. El análisis general se focaliza en el control de dos de sus funciones principales [3]:

- Regular la tensión del nudo de la red al que se conecta (PCC).
- Corregir el factor de potencia del PCC.



(a) STATCOM instalado por Alstom



(b) Representación de un STATCOM conectado en serie con un transformador

Figura 1.1. Información general del STATCOM [4] [1]

1.1. Situación actual

Los dispositivos FACTS siguen siendo percibidos en cierta medida como una tecnología nueva, sin embargo existen cientos de instalaciones en el mundo y una amplia aceptación y conocimiento sobre esta clase de tecnología. Uno de los dispositivos FACTS más utilizado es el compensador estático de potencia reactiva (SVC), desde principio de los 70 se estima un total de 90000 MVA de potencia instalada [2].

Sin embargo, el STATCOM en los últimos años ha tomado un rápido crecimiento en su aplicación en distintas áreas específicas, como se muestra en la Tabla 1.1. El desarrollo del controlador del STATCOM requiere el estudio de varios aspectos, tales como la configuración, la topología o los algoritmos de control empleados en los convertidores, todo ello desemboca en la existencia de más de 300 publicaciones sobre este tipo de tecnología [5].

STATCOM ha tomado un importante papel en la industria energética desde 1980s. EPRI en USA es un pionero en lo que respecta a las investigaciones de este área y ha desarrollado un elevado número de los proyectos existentes en colaboración con la industria [6].

Se puede observar en la Tabla 1.2 distintos ejemplos de la expansión del STATCOM [6], como resumen de los principales proyectos realizados por distintas compañías, desde que Kansai Electric Power Co., Inc. (KEPCO) y Mitsubishi Motors, Inc. desarrollaron el primer STATCOM en el mundo, de una potencia de 20 MVar empleando tiristores de conmutación en el convertidor, que empezó a operar en Enero de 1980.

Tipos	Número	Potencia aparente instalada (MVA)
SVC	600	90000
STATCOM	20	3000
Compensador en Serie	700	350000
TCSC	10	2000
HVDC B2B	45	18000
HVDC VSC B2B	1+(12 con cable)	2250
UPFC	2-3	250

Tabla 1.1. Estimación del número de dispositivos FACTS en el mundo y su potencia total instalada [2]

1.2. Problemática

La red eléctrica es un sistema complejo constituido por líneas de transmisión, transformadores y equipos auxiliares de distinta índole, cuyo objetivo es interconectar las fuentes de generación con las cargas eléctricas. Existen una serie de factores externos que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar mejoras y ampliaciones, algunos de los más significativos son la legislación ambiental, el panorama político y la situación económica global.

Para lograr un funcionamiento idóneo del sistema eléctrico se debe lograr evitar la presencia de armónicos, que impiden que se cumpla las condiciones necesarias para el funcionamiento correcto del sistema, tales como mantener la tensión y la frecuencia fundamental en valores constantes. Otro aspecto relevante es el factor de potencia que será un índice de la cantidad de potencia activa y en definitiva, potencia útil que se está logrando aprovechar. Dichas exigencias deben lograrse para cualquier carga representativa del consumidor y ante cualquier perturbación que provoque variaciones en la tensión o la intensidad del sistema [7].

La función de corregir el factor de potencia adquiere un gran interés a nivel industrial, donde en general una acumulación de cargas inductivas provoca un factor de potencia bajo. Dicho problema incrementa el coste de la electricidad, por las penalizaciones y multas al incumplir la legislación del suministro industrial, además de que para suministrar la misma cantidad de potencia útil, la magnitud de la intensidad es necesariamente superior, dificultando cumplir las limitaciones térmicas, que al ser violadas provocan el desgaste y

Características	Localización/Fecha	Compañía
STATCOM (20 MVar)	Enero de 1980	KEPCO y Mitsubishi Motors
STATCOM (1 MVar) Primero con GTO	Octubre de 1986	EPRI y Westinghouse Electric
STATCOM (± 80 MVar)	Central de generación de Inuyama (154 kV), en 1991	KEPCO y Mitsubishi Motors
STATCOM (± 100 MVar)	Subestación de Sullivan, en 1996	TVA, EPRI y Westinghouse Electric
STATCOM (8 MVar)	Parque eólico de Rejsby Hede, en 1997	Siemens
STATCOM (± 160 MVar)	En Julio de 1997	AEP y Westinghouse
STATCOM (± 200 MVar)	Subestación de 345 kV de Marcy en Febrero del 2001	EPRI y Siemens
STATCOM (175 MVar)	Claydon (Inglaterra), 2001	ALSTOM
STATCOM (+133/-41 MVar)	Subestación de 115 kV, desde Mayo del 2001	Vermont Electric Power Company's Essex
STATCOM de tres niveles de ± 100 MVar	Subestación de Talega California, Octubre del 2002	San Diego Gas & Electric (SDG&E)
STATCOM, compuesto de dos mitades de ± 75 MVar	Subestación de Glenbrook, Diciembre de 2003	ALSTOM

Tabla 1.2. Desarrollo histórico del STATCOM [6]

la reducción de la vida útil de los elementos que forman parte de dicho sistema. En definitiva, se desea un factor de potencia unitario para aumentar la potencia real o útil y evitar la inversión en dispositivos capaces de soportar intensidades superiores. Estas circunstancias ponen en valor la capacidad del STATCOM de actuar como corrector del factor de potencia [3].

Otra alternativa es la de regular la tensión del nudo al que se conecta, para mantener un valor constante frente a las perturbaciones producidas en el sistema. La complejidad de ofrecer una solución adecuada se eleva en circunstancias donde las variaciones que se deben hacer frente son enormes y rápidas. Un ejemplo idóneo de condiciones de carga con constantes cambios de extremada rapidez es el horno de arco eléctrico, donde el inicio de fundición es muy irregular y desequilibrado en un pequeño periodo de tiempo, lo que exige una respuesta rápida y eficaz del compensador dinámico. Aunque no existe una fórmula empírica representativa del concepto denominado como calidad de energía, se encuentran parámetros reveladores, tales como la distorsión armónica total (THD) o la variación máxima de la tensión eficaz del suministro en un determinado periodo de tiempo. Cabe destacar que la tensión es un elemento muy sensible a las fluctuaciones, al que el STATCOM ofrece una solución. Para mantener la seguridad y estabilidad del sistema eléctrico, las instalaciones de suministro deben situarse en unos límites del orden de $\pm 5\%$ de la tensión nominal, medido sobre un determinado periodo de tiempo (de pocos minutos a horas) [3].

Este problema tradicionalmente había sido solucionado por las compañías mediante la interconexión de diferentes sistemas eléctricos. Sin embargo, esto implica hacer más tendidos de líneas de transportes que encarecen el presupuesto. Dispositivos como el STATCOM son una solución más flexible, que ofrece un resultado satisfactorio tanto de manera local como en un área más amplia del sistema eléctrico.

1.3. Objetivo del trabajo

El objetivo principal de este proyecto es elaborar el modelo y el sistema de control de un STATCOM conectado a una red de media tensión. Por lo tanto, se ofrece el análisis de la finalidad de dicha tecnología en el sistema eléctrico, incidiendo en sus características y modos de operación. Los principales puntos de estudio se resumen en:

- Desarrollo teórico del modelo matemático del sistema representativo del STATCOM conectado a la red y su etapa de control.
- Estudio de las restricciones de operación del STATCOM, impuestas por los límites físicos de sus componentes.
- Implementación mediante Matlab/Simulink del control, ofreciendo un ejemplo del funcionamiento de la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM).
- Desarrollo de distintos escenarios de operación con cargas de distintas características mediante el programa informático Matlab/Simulink, para analizar el funcionamiento del STATCOM y su control.

1.4. Estructura del documento

El presente documento atiende a una estructura conformada por siete capítulos, de los que se ofrece una breve descripción de su finalidad:

- Capítulo 1. **Introducción.** Análisis de la situación actual del STATCOM, planteando el problema a tratar y el objetivo general del proyecto.
- Capítulo 2. **Estado del arte.** Estudio de los principales aspectos técnicos del STATCOM, tales como los dispositivos que conforman el convertidor, la técnica de modulación y su dimensionamiento.
- Capítulo 3. **Modelado y Control vectorial del STATCOM.** Desarrollo teórico del modelo matemático del sistema representativo del STATCOM conectado a la red y la implementación de la etapa de control considerando cuestiones como el sistema de referencia empleado, el lazo de seguimiento de la fase, la implementación de los límites físicos y el ajuste de los reguladores. Para ofrecer una explicación ilustrativa se introduce visualizaciones del modelo implementado mediante Matlab/Simulink.
- Capítulo 4. **Resultados de la Simulación.** Análisis de las características de operación del STATCOM ante situaciones de conflicto del sistema eléctrico que requieren su actuación.
- Capítulo 5. **Conclusión.** Resumen de las ideas y deducciones más relevantes que se han extraído de la elaboración del proyecto. Además, se enumera una serie de posibles mejoras en la implementación a fin de lograr resultados óptimos o posibles avances futuros.
- Capítulo 6. **Presupuesto.** Análisis económico a la hora de decidir la instalación de un STATCOM y presupuesto personal del proyecto.
- Capítulo 7. **Planificación del proyecto.** Esquema de la distribución de tareas en la elaboración de este trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte

En los últimos tiempos, la industria moderna ha optado por la búsqueda de alternativas eficientes en el sistema eléctrico que han llevado a la evolución de tecnologías más novedosas, las cuales se han aprovechado de las ventajas de las innovaciones desarrolladas en la electrónica de potencia, frente a los dispositivos electromecánicos, que presentaban importantes defectos como elevados costes de mantenimiento y una actuación lenta a la hora de responder ante situaciones de conflicto.

Las consecuencias de no lograr un funcionamiento idóneo en el sistema eléctrico, se traduce en un flujo inadecuado de la potencia activa y reactiva, que provoca efectos negativos como pérdidas en la transmisión, incumplir los límites térmicos o de tensión, además de la pérdida del control y la estabilidad del sistema. En un negocio donde las líneas presentan un constante crecimiento y donde se busca aumentar la seguridad, la disponibilidad, la capacidad y la flexibilidad de operación ante los conflictos comentados, los dispositivos FACTS como el STATCOM se presentan como una elección óptima [1].

La estructura de este capítulo se divide en un resumen del concepto de los FACTS en el punto 2.1, donde se nombra los principales elementos que conforman esta familia, centrándose primordialmente en la comparación entre el SVC y el STATCOM.

En el apartado 2.2 se profundiza en las características de operación del STATCOM, que le posibilitan la capacidad de ofrecer soluciones eficaces a los inconvenientes planteados en la sección 1.2. En dicho punto se analiza también las características del sistema y se define sus elementos principales.

En el punto 2.3 se estudia las características técnicas del STATCOM, tales como las propiedades de los componentes que lo conforman, la topología del convertidor, la técnica de modulación y su dimensionamiento.

A raíz del análisis teórico de los conceptos planteados, se procederá en el Capítulo 3 al estudio del modelo matemático y la implementación del control mediante el programa informático Matlab/Simulink.

2.1. Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna, FACTS

Los FACTS son definidos por el grupo de investigación de IEEE como: "Sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan electrónica de potencia, basados en la utilización de controladores estáticos, asegurando el control e incrementando la capacidad de transferencia de la potencia" [8]. Su desarrollo se sustenta en el avance de la electrónica de potencia en las últimas décadas, logrando elevar la versatilidad y las alternativas para solucionar los problemas habituales del sistema eléctrico. A pesar de los beneficios tanto económicos como operativos que supone alcanzar el control electrónico de la red eléctrica [1], cabe destacar que la introducción de estos en el mercado ha sido inferior a las expectativas iniciales. Dicha realidad se fundamenta en factores como las imprecisiones en la política medioambiental y la situación económica que también ha afectado al negocio de la transmisión, generación y distribución eléctrica.

Algunos de los FACTs más conocidos son el cambiador de toma bajo carga (LTC), el compensador estático de potencia reactiva (SVC) presentado en la Figura 2.1, el condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (TCSC), como el mostrado en la Figura 2.2, el controlador de potencia de interfase (IPC), el compensador estático síncrono de potencia reactiva (STATCOM) y el controlador unificado de flujo de energía (UPFC).



Figura 2.1. SVC para estabilizar un sistema de transmisión de 735 kV en Chénier, Canada [9]

La primera generación de FACTS, se compone de los primeros desarrollos en electrónica de potencia, destacando los transformadores de cambio de toma o de fase. La segunda generación corresponde a dispositivos que emplean algunos desarrollos electrónicos más recientes como el UPFC y el STATCOM, con un funcionamiento más complejo y un control más amplio. Los principales problemas del sistema eléctricos a los que los dispositivos FACTS ofrecen solución quedan resumidos en la Tabla 2.1.

Problemas de operación	Actuación para corregir el problema	Controladores FACTS
Límites de tensión:		
Tensión inferior ante una carga pesada	Inyección de potencia reactiva	STATCOM, SVC
Tensión superior ante carga suave	Absorción de potencia reactiva	STATCOM, TCR, SVC
Tensión superior seguida de un corte	Absorción de potencia reactiva, previniendo la sobrecarga	STATCOM, TCR, SVC
Tensión inferior seguida de un corte	Inyección de potencia reactiva, previniendo la sobrecarga	STATCOM, SVC
Límites térmicos:		
Sobrecarga en la transmisión	Reducir la sobrecarga	TCSC,SSSC,PS, UPFC,IPC
Disparo de circuito en paralelo	Limitar la sobrecarga del circuito	TCSC,SSSC,PS, UPFC,IPC
Flujos circulares:		
Líneas paralelas compartiendo carga	Ajustando las reactancias en serie	TCSC,SSSC,PS, UPFC,IPC
Flujo de carga compartido después de una falla	Arreglar la conexión o actuar considerando el límite térmico	TCSC,SSSC,PS, UPFC,IPC
Cambio en la dirección del flujo de carga	Ajustar el ángulo de fase	SSSC,PS, UPFC,IPC

Tabla 2.1. Modo de actuación de los FACTS, ante problemas del sistema eléctrico [1]



Figura 2.2. Dos TCSC instalados por PGCIL (Power Grid Corporation of India Ltd) [10]

La ventaja operativa de dichos convertidores se sustenta en las novedades tecnológicas ofrecidas por elementos como el transistor de unión bipolar de puerta aislada (IGBT) o el tiristor controlado por puerta integrada (IGCT) [2]. Los denominados compensadores de reactiva, tales como el STATCOM o el SVC, en contraposición con elementos mecánicos de encendido tienen un control más preciso, eficiente y adecuado para ofrecer respuestas instantáneas frente al amplio marco de problemas que afectan a la estabilidad de la red.

El SVC es uno de los FACTS más ampliamente utilizados y aceptados, aunque en la comparativa entre ambos dispositivos, la actuación del STATCOM es superior a la del compensador estático de reactiva, debido a la utilización de IGBTs frente a los tiristores convencionales del SVC. Esta diferencia adquiere una mayor relevancia a la hora de responder a las caídas de tensión, dado que la potencia reactiva del SVC depende del cuadrado de dicha tensión, lo que conlleva que en el momento más crítico cuando la tensión es inferior a la idónea, la capacidad de inyectar potencia reactiva se ve mermada por dicha condición [2].

Otra de las aplicaciones más extendida de ambos dispositivos en el ámbito industrial o comercial es la de mejorar la calidad de la energía, como en el caso de los flickers en las luces. Sectores como el de la producción a partir de recursos renovables, también se benefician del control dinámico de la tensión frente a las frecuentes fluctuaciones. A pesar de ser relativamente nuevo y más caro, dentro de los mismos términos de tamaño, el STATCOM debería ser la opción más rentable por su eficiencia superior [8].

2.2. Compensador estático síncrono, STATCOM

Un STATCOM es un dispositivo de maniobra constituido por un convertidor de DC-AC también llamado inversor, a partir de una fuente de tensión de alimentación [2]. El principal objetivo de este compensador de reactiva es la reducción de la potencia reactiva indeseada, en la Figura 2.3 se observa un modelo de STATCOM.

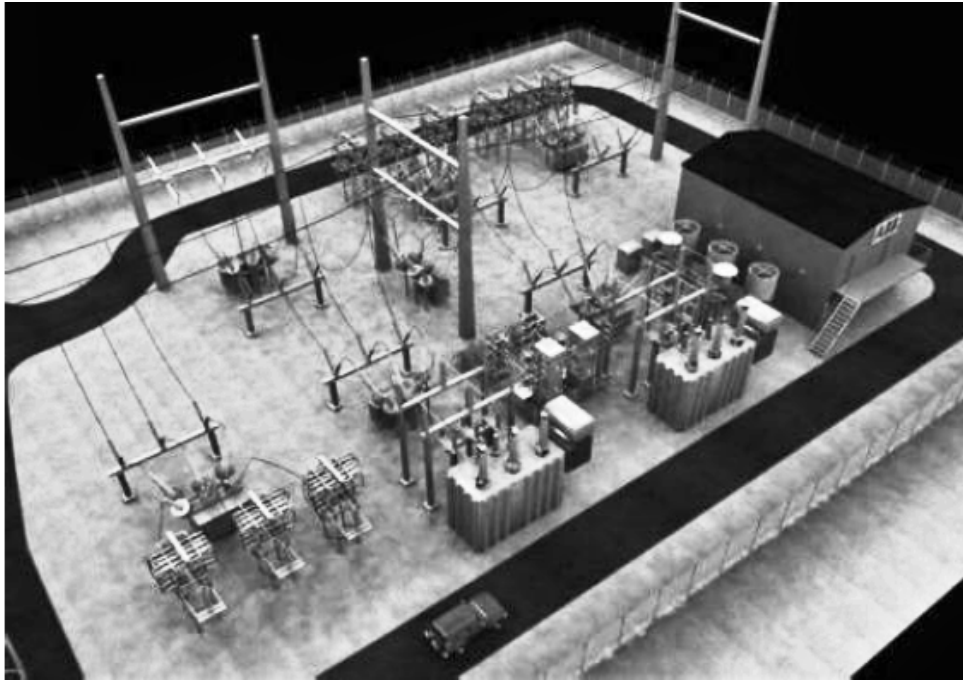


Figura 2.3. STATCOM [2]

El STATCOM presenta una serie de ventajas en diferentes aspectos relevantes en la transmisión y distribución de energía en las redes industriales, tales como [2]:

- El intercambio de potencia reactiva, a través de un balance de potencia óptimo.
- Mejora de la estabilidad estática y transitoria.

El STATCOM presenta dos ventajas muy relevantes frente al SVC [6]:

1. Una actuación dinámica sobresaliente respecto al resto de compensadores de reactiva, la cual se evidencia en respuestas muy rápidas (llegando incluso a los 10 ms o menos) y precisas [11].
2. Preservar toda la capacidad de la intensidad de salida en sistemas de baja tensión, lo cual también lo hace más efectivo que el SVC en mejorar la estabilidad transitoria. En caso de cortocircuito (descenso pronunciado de la tensión), el STATCOM a diferencia del SVC, no limita su aporte de reactiva pese a que se encontraría a niveles de tensión muy bajos. Un dato significativo se muestra en las simulaciones de la referencia [6], donde se demuestra que un SVC de 1.3 MVar y un STATCOM con un menor tamaño de 1 MVar producen un efecto similar a la hora de mantener la estabilidad dinámica de la tensión, pese a que previsiblemente el último tendría una capacidad menor.

En la Figura 2.4 se muestra un diagrama de corrientes máximas de ambos dispositivos (I_{vR}), donde se evidencia que en el caso del STATCOM (a) estas son independientes de la tensión (V_{vR}), a diferencia del caso del SVC (b). Esto implica que incluso durante las contingencias más complejas, el STATCOM mantiene su plena capacidad.

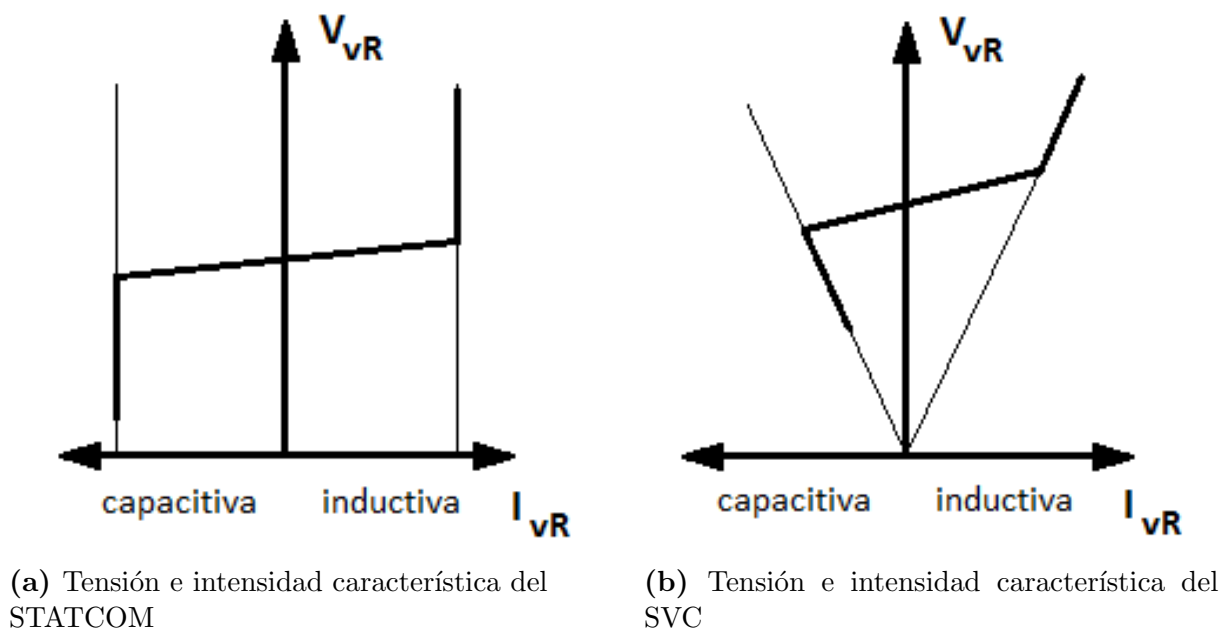


Figura 2.4. Comparativa de la actuación del STATCOM y el SVC [2]

Otros factores beneficiosos que suponen un añadido a todas las ventajas operativas comentadas del STATCOM, son los bajos costes de operación y mantenimiento. Todas estas ventajas se fundamentan en dispositivos que a diferencia de los tiristores ofrecen la posibilidad de apagado, aumentando considerablemente su margen de libertad de actuación [3].

En la actualidad, el empleo de inversores en fuente de tensión para la interconexión en el sector de la distribución energética es una práctica ampliamente extendida. El próximo paso para la evolución del STATCOM es la combinación con fuentes de energía en la etapa de continua (DC), lo que posibilitaría la combinación de potencia activa y reactiva, logrando un equilibrado de operación de la red de nivel superior [2].

2.2.1. Características de operación del STATCOM

La instalación del STATCOM en puntos estratégicos de la red conlleva un aumento de la capacidad de transferencia y disminuye el número de pérdidas, siempre que se respete sus condiciones de actuación. Un compensador ideal debería:

- Suministrar exactamente la potencia reactiva exigida por la carga.
- Presentar un valor constante de la tensión en sus terminales.

Para lograr entender la necesidad de la actuación del propio STATCOM, se analiza los efectos negativos que se producen en la red, dependiendo de la naturaleza de la propia carga. Los ejemplos se analizan con un circuito equivalente de Thevenin conformado por los elementos:

- E : Tensión del circuito abierto.
- V : Tensión del terminal.
- δ : Ángulo de carga
- Z_s : Impedancia interna.
- X_s : Reactancia interna.
- R_s : Resistencia interna.

La impedancia interna Z_s que modela la línea de transporte y la impedancia interna de la fuente, generalmente presenta una componente reactiva (X_s) de orden superior al de la componente resistiva (R_s) [3], lo que desemboca en la aproximación de solo considerar la componente reactiva.

Si se conecta a la red una carga puramente resistiva (R) se extrae potencia activa, que se manifiesta en la variación de los ángulos de fase de la tensión del terminal y la del circuito abierto, denominado ángulo de carga. La tensión del terminal (V) no varía notablemente respecto a la del circuito abierto (E), debido a la ortogonalidad y que $X_s I$ solo representa una pequeña fracción del valor de E , como se observa en la Figura 2.5.

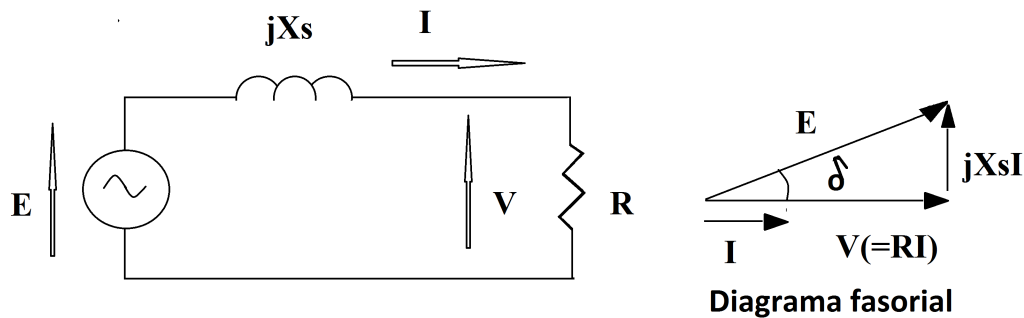


Figura 2.5. Diagrama fasorial con una carga puramente resistiva [3]

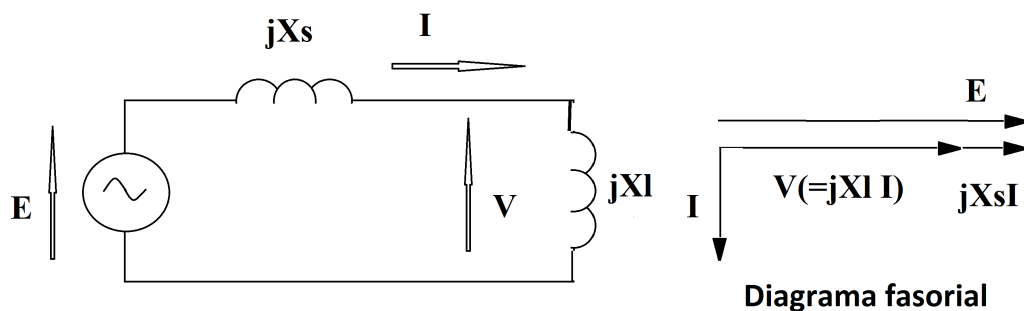


Figura 2.6. Diagrama fasorial con una carga puramente reactiva [3]

En el caso de que la carga fuese puramente inductiva, no se produce ninguna variación en el ángulo de carga y no se consume potencia activa, como se muestra en la Figura 2.6. La caída de tensión provocada por la intensidad que atraviesa la inductancia $X_s I$ se encuentra en fase con la tensión del circuito abierto (E) y la del terminal (V), provocando fuertes alteraciones de esta última que generan inestabilidad. Este es un problema frecuente en las redes, un ejemplo es el empleo de reactancias de compensación en las líneas de transmisión y distribución, para disminuir una tensión excesivamente elevada, especialmente en tomas lejanas a los sistemas de generación. Sin embargo, en los momentos donde se necesita una tensión superior, dicha solución es contraproducente, mientras que el STATCOM responde dinámicamente a las condiciones del sistema en cada instante [3].

La Figura 2.7 muestra el efecto de conectar una carga puramente capacitiva, donde de nuevo el ángulo de carga y la potencia activa es nula, pero la caída de tensión producida en la reactancia $X_s I$ es de fase contraria a E y V. Las capacitancias son empleadas para elevar la tensión cuando se produce descensos de esta, como ocurre en el caso de haber utilizado reactancias de compensación (disminuyen la tensión) o encontrarse en un período de carga muy elevada (horario laboral) [3].

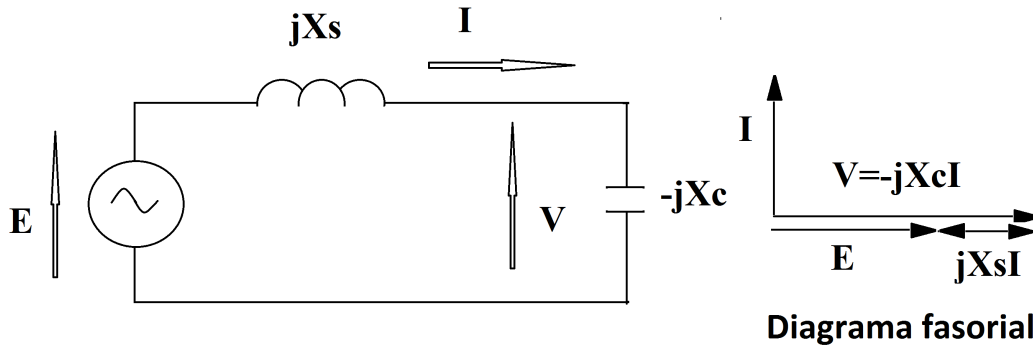


Figura 2.7. Diagrama fasorial con una carga puramente capacitiva [3]

Tanto las capacitancias como las reactancias solo producen o absorben potencia reactiva y solo suponen las pérdidas propias del devanado. Como se observa en la Figura 2.8, la tensión sufre variaciones en función de la naturaleza de la carga como se ha analizado.

Para mantener la tensión del nudo al que se conecta en el valor deseado, se requiere una potencia reactiva determinada (Q_{vR}), que suministra el STATCOM como compensador de reactiva. Dicha potencia provoca variaciones en el punto donde se conecta la carga ($Q_s = Q_{vR} + Q_c$), además es dependiente de la variación del propio fasor ΔV , que representa la caída de la tensión en la impedancia interna expresada en (2.1) [3].

$$\Delta V = (R_s + jX_s) \frac{P}{V} \quad (2.1)$$

$$|E|^2 = \left| V + \frac{R_s P + X_s Q_s}{V} \right|^2 + \left| \frac{X_s P - R_s Q_s}{V} \right|^2 \quad (2.2)$$

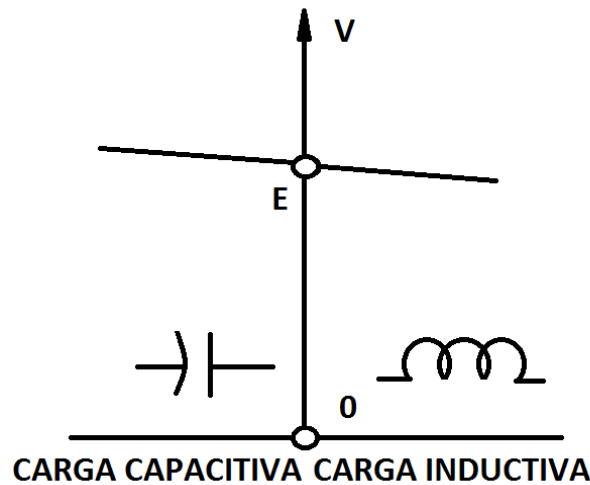


Figura 2.8. Relación entre la tensión e intensidad [3]

La expresión (2.2) demuestra que siempre existe un valor de la potencia reactiva del compensador, la cual puede controlarse continuamente, con el que se eliminan las variaciones de tensión originadas por la potencia reactiva de la carga. Dicho principio permite mantener la magnitud de la tensión en el valor nominal y ofrecer una solución óptima a los problemas comentados.

El otro problema es el factor de potencia, el cual no debe presentar un valor reducido, lo que implica una potencia útil inferior a la máxima posible, puesto que dicho valor es el resultado de la relación entre la potencia real (P) y la potencia aparente (S). Reducir la magnitud del factor de potencia ($\cos \Phi$) acarrea otras consecuencias negativas, tanto en la intensidad, debido a que su magnitud final se ve condicionada en una proporción $1/\cos \Phi$, como en las pérdidas de Joule en los cables de suministro, que se incrementan en un factor de $1/\cos^2 \Phi$ [3]. Un factor de potencia superior supone que con una intensidad de suministro inferior (I_s) se alcanza a proporcionar toda la potencia útil necesaria.

Mediante la compensación de reactiva se consigue un efecto similar al de conectar en paralelo a la carga inductiva, un condensador. El mejor caso posible es un factor de potencia unitario, donde la intensidad del STATCOM como compensador de potencia reactiva es de un módulo idéntico a la proporcionada por la carga, pero de signo contrario [3], ambas en fase con la tensión como se evidencia en la Figura 2.9. De este modo, la potencia reactiva en el punto donde el compensador se conecta a la red es nula ($Q_s = 0$), puesto que la potencia reactiva de la carga, independientemente de su carácter, ha sido neutralizada ($Q_{vR} = Q_c$).

Cabe resaltar que aunque el STATCOM sirve como solución a cualquiera de los dos problemas planteados, no puede mantener la tensión constante y el factor de potencia unitario al mismo tiempo [3].

Para determinar su actuación es necesario analizar las características de operación que existe entre este y el PCC, dicho esquema se conforma generalmente de un transformador de acoplamiento, un filtro, un convertidor y un condensador en la etapa de continua (DC).

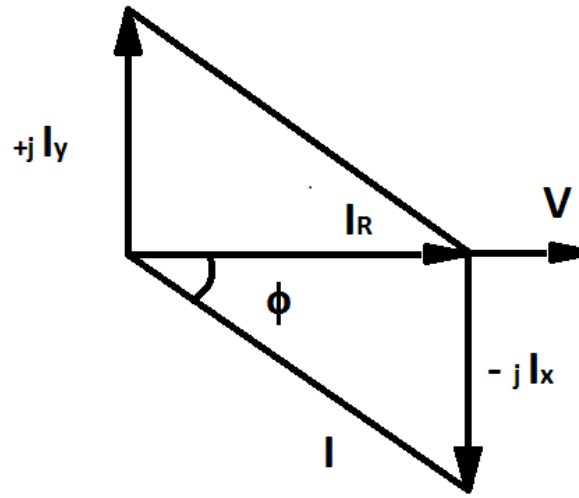


Figura 2.9. Diagrama fasorial de las intensidades, en el modo de corrección del factor de potencia [3]

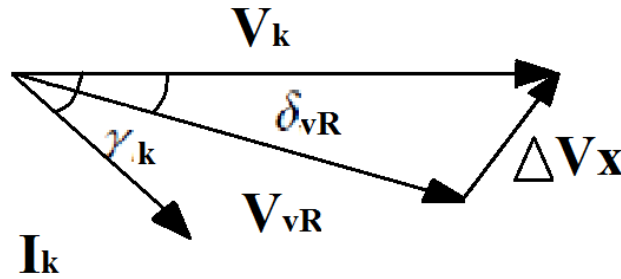
El análisis mostrado se fundamenta en la consideración de que el intercambio de potencia activa entre el PCC y el STATCOM puede ser despreciable y solo existe intercambio de reactiva, la validez de los resultados obtenidos es considerable, pese a dicha estimación. Cabe precisar que debido a que el filtro conectado al STATCOM contiene una pequeña componente resistiva, junto a que en el convertidor se producen pérdidas en la potencia interna, desemboca en un flujo de potencia activa que será entregado por la red. Dicho término en condiciones de funcionamiento normal suele resultar ínfimo, pero en el caso de que las intensidades sean elevadas, alcanza una mayor relevancia.

La tensión del nudo de la red donde se conecta el STATCOM ($V_k \angle 0$) se considera sinusoidal y se emplea como referencia en los diagramas fasoriales explicativos presentados posteriormente. Mientras que la componente de la tensión de alterna del convertidor que produce el STATCOM, es $V_{vR} \angle \delta_{vR}$. Nótese como ahora la nomenclatura de las tensiones cambian con respecto a E y V, utilizada en las gráficas anteriores.

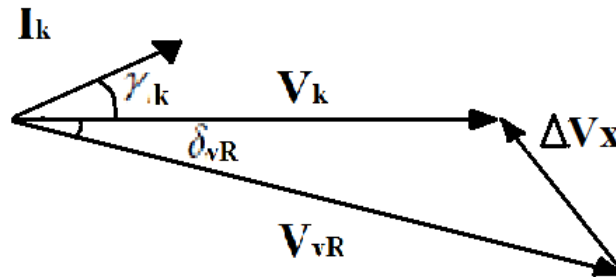
La Figura 2.10 es una representación de las dos posibles configuraciones de actuación del circuito de un STATCOM, el primer caso presenta un carácter inductivo donde la intensidad se encuentra retrasada respecto a la tensión de la red. Mientras que en el segundo caso el circuito tiene un carácter capacitivo, puesto que la intensidad está adelantada respecto a la tensión de red. En ambos casos, la potencia activa y reactiva que se transfiere quedaría definida por las expresiones (2.3) y (2.4) [1].

$$P = \frac{V_k V_{vR}}{X_l} \sin \delta_{vR} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{V_k^2}{X_l} - \frac{V_k V_{vR}}{X_l} \cos \delta_{vR} \quad (2.4)$$



(a) Intensidad retrasada respecto a la tensión de referencia (carácter inductivo)



(b) Intensidad adelantada respecto a la tensión de referencia (carácter capacitivo)

Figura 2.10. Operación del convertidor en fuente de tensión (VSC) [1]

En el momento de analizar ambos modos de operación existe una serie de observaciones que son necesarias tener en cuenta, tales como [3]:

- El intercambio de energía es producto de un balance de potencia. La tensión de salida del convertidor en fuente de tensión (V_{vR}) está retrasado respecto a la tensión de la red (V_k), por un ángulo de carga (δ_{vR}). La corriente de entrada está retrasada $\pi/2$ respecto a la caída de tensión que se produce en la reactancia (ΔV_x).
- La potencia activa que se intercambia entre el STATCOM y el PCC, queda definida por el ángulo de carga (δ_{vR}). La potencia activa fluye al convertidor desde la tensión de red cuando $\delta_{vR} < 0$, mientras que el proceso contrario se genera si $\delta_{vR} > 0$.
- La potencia reactiva que fluye entre ambos puntos está determinada principalmente por la variación existente entre la magnitud de la tensión de red (V_k) y la tensión fundamental de salida del convertidor (V_{vR}). En el caso de que la magnitud de tensión del inversor sea superior ($V_{vR} > V_k$), el VSC generaría potencia reactiva, en el caso contrario ($V_{vR} < V_k$), el convertidor que opera como rectificador consume potencia reactiva.

La tensión de salida del convertidor a la frecuencia fundamental, será el resultado del producto de la tensión de la etapa de continua (V_{DC}) y la técnica de modulación empleada. En estado estacionario a la frecuencia fundamental, el STATCOM podría representarse como se muestra en la Figura 2.11, donde se le podría considerar como una fuente de tensión de alterna variable (V_{vR}), en la que existe la posibilidad de controlar tanto la magnitud como el ángulo de fase.

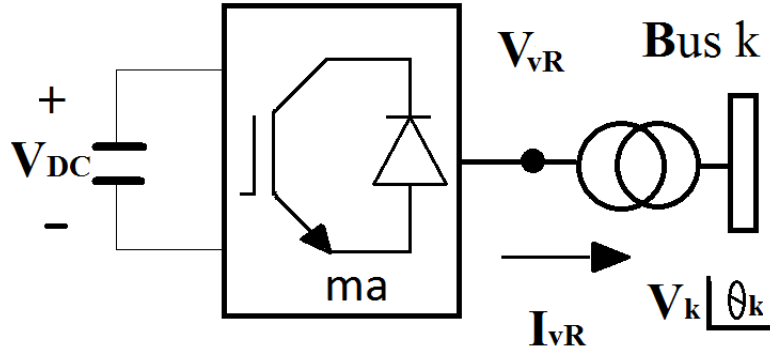


Figura 2.11. Representación esquemática de un convertidor en fuente de tensión, conectado a la red mediante un transformador en serie [1]

El objetivo final será controlar el intercambio de potencia con el punto de conexión a la red (PCC). La tensión de la fuente trifásica del STATCOM quedaría definida en la expresión (2.5).

$$V_{vR} = |V_{vR}| (\cos \delta_{vR} + j \sin \delta_{vR}) \quad (2.5)$$

Mientras que la magnitud de la tensión del inversor (V_{vR}) estaría delimitada implícitamente por la capacidad del propio condensador, mientras que la libertad del ángulo de carga (δ_{vR}) es absoluta, con valores entre 0 y 2π radianes. La ecuación de transferencia de la intensidad que fluye entre el convertidor y la red quedará definida como [1]:

$$[I_k] = [Y_{vR} \quad -Y_{vR}] \begin{bmatrix} V_k \\ V_{vR} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dónde:

- I_k : Vector de la intensidad.
- V_k : Vector de la tensión en el nudo de acoplamiento a la red.
- V_{vR} : Vector de la tensión de salida del convertidor.
- Y_{vR} : Matriz de admitancia.

2.2.2. Régimen permanente del STATCOM

Los parámetros del control tales como la magnitud y el carácter de la potencia reactiva y activa necesaria para la meta fijada, son establecidos a raíz de un flujo de carga. Existe una amplia aceptación de la validez y seguridad que proporciona métodos iterativos como el Newton-Raphson, a la hora de ofrecer una solución al flujo de carga existente en las líneas de transmisión de la red eléctrica en régimen permanente.

La complejidad añadida de aumentar el rango de operación por los nuevos dispositivos de electrónica, ha provocado el desarrollo del análisis del flujo de carga, un aspecto que no ha sido tan remarcado o ampliamente documentado y con una menor presencia en artículos científicos o referencias bibliográficas [1].

En el caso del STATCOM, se valora como una fuente de tensión alterna síncrona como se establece en la Figura 2.12, donde los límites tanto superior como inferior en la magnitud de su tensión son fijados. El nudo al que el STATCOM estaría conectado se trata de una barra de tipo PV, cuando se emplea para mantener la tensión eficaz del PCC en un valor marcado externamente y PQ, si el objetivo es definir el factor de potencia deseado. En el primer caso también podría considerarse una barra PQ, cuando los límites establecidos son sobrepasados, donde la potencia activa o reactiva tanto generada como absorbida quedaría establecida en los máximos señalados.

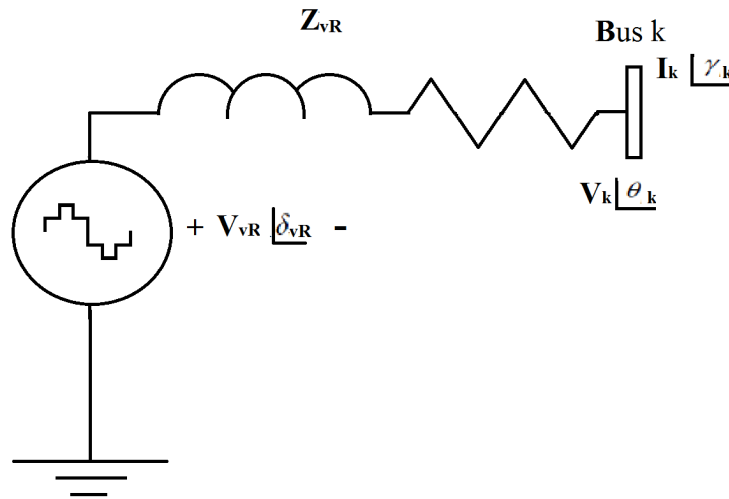


Figura 2.12. Representación esquemática de un STATCOM conectado a la red [1]

El intercambio de potencia de reactiva y activa entre ambos puntos queda definido en las siguientes expresiones [1]:

$$S_{vR} = V_{vR} I_{vR}^* = V_{vR} Y_{vR}^* (V_{vR}^* - V_k^*) \quad (2.7)$$

$$P_{vR} = V_{vR}^2 G_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (2.8)$$

$$Q_{vR} = -V_{vR}^2 B_{vR} + V_{vR} V_k [G_{vR} \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (2.9)$$

$$P_{vR} = V_k^2 G_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (2.10)$$

$$Q_{vR} = -V_k^2 B_{vR} + V_k V_{vR} [G_{vR} \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (2.11)$$

A partir de dichas ecuaciones y considerando la magnitud de la tensión del convertidor y su ángulo de fase como variables de estado, el modelo linealizado del STATCOM conectado a la red se definiría con la siguiente matriz [1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{vR} \\ \Delta Q_{vR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial P_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_{vR}} V_{vR} \\ \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_{vR}} V_{vR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \Delta \delta_{vR} \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \end{bmatrix}$$

2.2.3. Descripción del sistema de estudio

El ejemplo de análisis de este proyecto es el correspondiente a la referencia [12], donde proporciona una comparativa con los resultados experimentales obtenidos en un laboratorio, que sirve como validación a la propia simulación. En dicha referencia, se presenta la simulación de un DSTATCOM, el cual opera como un compensador de potencia reactiva, mediante modulación por ancho de pulsos. Es necesario resaltar que cuando un STATCOM se emplea en sistemas de distribución recibe el nombre de DSTATCOM [13].

Desde el punto de vista técnico existen diferencias importantes entre el DSTATCOM y el STATCOM, puesto que el segundo solo inyecta una intensidad trifásica casi sinusoidal y equilibrada, mientras que el DSTATCOM debe tener la capacidad de inyectar intensidad en cada fase de la red independientemente del resto, las cuales pueden estar desequilibradas o presentar contenido armónico, donde el objetivo del dispositivo será equilibrar la red y eliminar su distorsión armónica [13]. El algoritmo de control podría ser significativamente diferente entre el STATCOM y el DSTATCOM, en este proyecto se ha implementando un STATCOM donde los modos de operación a estudiar son la corrección del factor de potencia y la regulación de la tensión del PCC y no reducir el contenido armónico de la conexión, como se analiza en el punto 2.2.1.

El objetivo final será ofrecer una descripción explicativa del funcionamiento de un STATCOM con las características semejantes al expuesto, analizando el control de las metas estipuladas:

- Control de la tensión de DC.
- Control del factor de potencia.
- Control de la tensión de AC en el PCC.

2.3. Configuración del STATCOM

Definir las características del funcionamiento del STATCOM, requiere precisar cuestiones técnicas como la configuración del convertidor, los dispositivos que lo conforman, el algoritmo o la técnica de modulación empleada y las limitaciones físicas inherentes de sus propios componentes. En este apartado se realizará una breve descripción de los distintos aspectos comentados, incidiendo en las elecciones empleadas en este proyecto.

2.3.1. Convertidor trifásico

En la actualidad, el empleo de convertidores de continua-alterna esta ampliamente extendido, debido a la necesidad de alimentar cargas eléctricas en corriente alterna alimentadas de fuentes en corriente continua, como baterías o condensadores. Los principales ámbitos de la industria electrónica que requieren su empleo son [14]:

- El suministro de energía a través de fuentes renovables.
- Telecomunicaciones, con el uso de repetidores para no perder información por interferencias o señales débiles.
- Sistemas de generación de forma ininterrumpida.
- Plantas de control.
- Sistemas de transporte, como ferrocarriles (alimentados a través de la catenaria) o los vehículos eléctricos alimentados mediante baterías de litio.

Los inversores a partir de la señal de continua generan una señal similar a la de una onda sinusoidal, para inyectar energía a un sistema de alterna. Las técnicas de control determinan el cierre y la apertura de los interruptores, para cumplir dicha finalidad.

Es necesario recalcar que todo convertidor formado por interruptores autoconmutados puede actuar tanto como inversor logrando la transformación de continua a alterna, como rectificador realizando el proceso inverso y siendo capaz de obtener de una onda sinusoidal, una señal constante de continua. De este modo, el convertidor actuará como inversor cuando la tensión de toma del STATCOM (V_{vR}) sea superior a la tensión del PCC (V_k), suministrando potencia reactiva, mientras que en la situación opuesta donde la tensión del acople sea mayor, el convertidor actuará como rectificador y absorberá potencia reactiva de la red, como se analiza en el punto 2.2.1. Es conveniente resaltar que el STATCOM actuará como inversor en la mayoría de casos.

La topología del convertidor es una cuestión importante [14], dentro de los convertidores de dos niveles destacan el de medio puente, el transformador con toma de medida o el de puente completo. La configuración del convertidor de medio puente es simple, como se presenta en la Figura 2.13 (a), está conformado por dos interruptores y estos solo permiten el flujo en una sola dirección, utilizándose diodos antiparalelos para que la corriente pueda circular en sentido contrario.

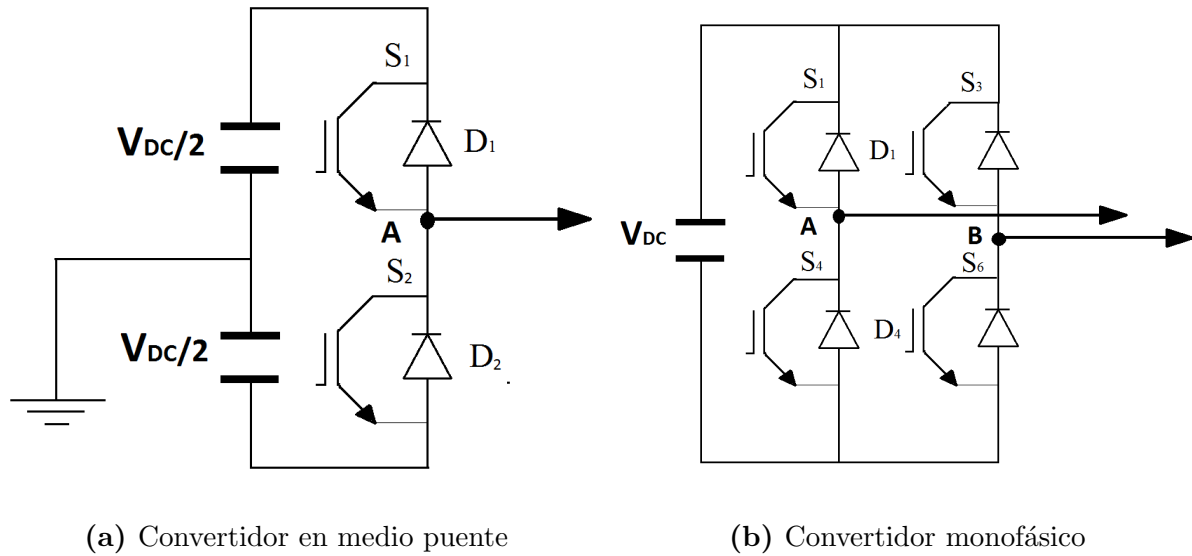


Figura 2.13. Ejemplos de topologías del convertidor de dos niveles [14]

A la hora de configurar el orden de disparo de los interruptores, se hace fundamental el empleo del denominado tiempo muerto, que se trata del retraso existente entre la apertura y el cierre del siguiente interruptor, la coincidencia del cierre de ambos provocaría una situación crítica de cortocircuito de la fuente de alimentación [14].

Configuraciones como el inversor monofásico en puente completo como el mostrado en la Figura 2.13 (b), formado por la unión de dos inversores de medio puente conectados a la misma fuente de alimentación, son opciones más versátiles por la posibilidad de aumentar la tensión.

En este proyecto se ha optado por una de las configuraciones más empleadas que es el inversor de dos niveles trifásico de puente completo o VSC trifásico de seis pasos convencional, mostrado en la Figura 2.14. Esta configuración consiste en seis interruptores ($S_1 - S_6$) y seis diodos antiparalelos ($D_1 - D_6$), donde el número indica su orden de encendido. En este caso la carga trifásica estaría conectada entre los puntos A, B y C. A pesar del hecho de que existiría la posibilidad de un neutro ficticio (O) como punto medio, en la mayoría de casos no está disponible [3]. Obviamente al aumentar el número de ramas se eleva el número de estados posibles, donde cada rama varía entre $+V_{DC}$ ó $-V_{DC}$. Existen ocho posibilidades de estado distintas, de las que dos solo sirven en casos de protección, las cuales se producen cuando todos los interruptores están cerrados o abiertos. La forma de la onda quedará definida por la combinación de todos los estados posibles.

Las tres ramas del inversor trifásico son controladas con un desfase entre ellas de 120° . La forma más básica de controlar un VSC trifásico de seis interruptores es encender cada interruptor en la mitad del periodo (180°), con una secuencia en orden ascendente 1,2,3,... De este modo cada interruptor se retrasará 180° y cada 60° un nuevo interruptor se enciende al tiempo que uno del siguiente grupo se apaga. En cualquier momento, uno de los interruptores de cada rama está encendido.

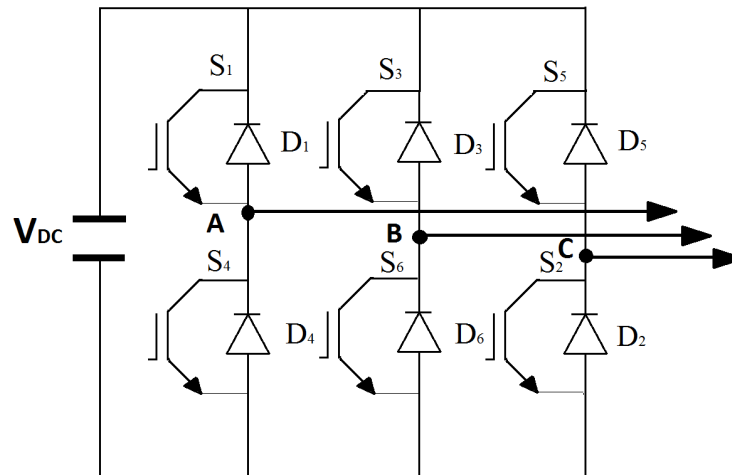


Figura 2.14. Convertidor trifásico [3]

Cabe destacar que en este caso se ha optado por convertidores convencionales de fuente en tensión de dos niveles en lugar de los multinivel. Sin embargo, estos últimos presentan ventajas, especialmente en aplicaciones de media y gran potencia, dado que permiten operar en un mayor número de niveles de la tensión de DC, logrando una representación mas fidedigna de la onda sinusoidal de la tensión de salida del convertidor [15].

Los convertidores además de clasificarse por su configuración, pueden distribuirse en dos categorías en función de la fuente de entrada utilizada en el lado de continua (DC) [3]:

1. Los inversores en fuente de tensión (VSC) en el lado de continua, generalmente un condensador. Esta opción permite un flujo bidireccional, dependiendo del signo de la corriente que puede ser negativo o positivo.
2. Los inversores en fuente de corriente (CSCs). Esta opción presenta como ventajas principales que las inductancias que se emplean son más económicas que los condensadores, porque presentaría menos pérdidas de Joule en el sistema de almacenamiento, y además el exceso de tensión tienen mayor probabilidad de ser perjudicial para el condensador que el exceso de las intensidades para las inductancias [16]. No obstante, los STATCOM basados en el empleo de los CSC no están desarrollados y no se comercializan, principalmente por sus problemas potenciales. Dichos defectos pueden llegar a ser subsanados por nuevas tecnologías desarrolladas en la superconducción a elevadas temperaturas o temperaturas medias (como el recientemente descubrimiento del boruro de magnesio con una temperatura de transición de 39 K [16] [17]).

Aunque la opción de emplear una fuente de corriente sería más idónea por la elevada eficiencia de sus dispositivos, en general en aplicaciones de compensación de reactiva, se hace uso de una fuente de tensión, como es el caso del STATCOM.

2.3.2. Dispositivos de conmutación

El desarrollo del STATCOM está estrechamente ligado a la evolución de los dispositivos de conmutación en los últimos treinta años, en los que se ha logrado modelos más eficientes y con una mayor capacidad de control. En función de la posibilidad de encendido y apagado se establece la siguiente clasificación general [3]:

1. No controlables. Son modelos más convencionales, sin posibilidad de controlar el encendido y apagado. Una actuación conveniente requiere aprovechar las condiciones de funcionamiento del propio circuito. Un ejemplo serían los diodos.
2. Semi-controlados. A diferencia del grupo antecesor permiten la capacidad de encendido mediante una señal de disparo en su puerta. Destaca el tiristor.
3. Totalmente controlado. Mayor libertad de control, con la posibilidad de encendido y apagado. En esta categoría se encuentra los principales transistores, tales como el BJT y el MOFSET, hasta dispositivos híbridos producto de la combinación de los dos modelos anteriores, como es el caso del IGBT, GTO, MCT y muchos otros que se han introducido en los últimos tiempos.

Los semiconductores totalmente controlados, debido a sus condiciones de funcionamiento, se utilizan en un amplio rango de aplicaciones en el sistema eléctrico como es el caso del STATCOM. En función de los niveles de energía del convertidor tanto en alta como en baja potencia existen semiconductores que ofrecen características favorables [3], como se puede observar en la Figura 2.15.

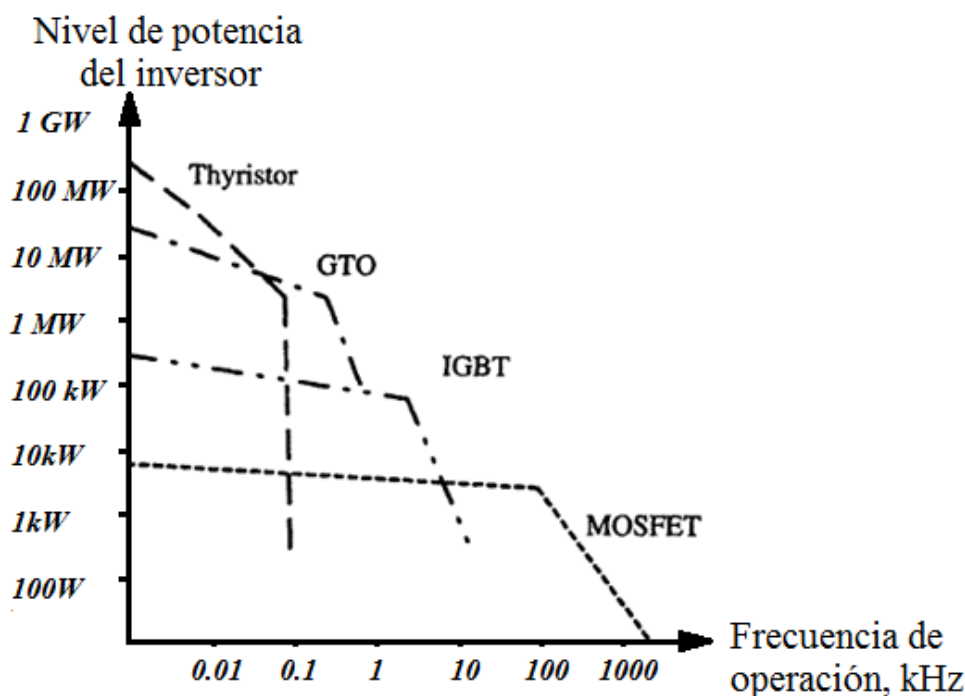


Figura 2.15. Clase de semiconductor totalmente controlado idóneo, en función del nivel de potencia y frecuencia del convertidor [3]

El STATCOM estudiado se sitúa en la media potencia, con una frecuencia de 60 Hz, lo que convierte a los IGBTs en la opción más idónea [18]. Los últimos desarrollos invitan a imaginar la aparición de nuevos modelos y materiales, que aumenten la capacidad de control y reduzcan la impedancia de estos dispositivos [2].

2.3.3. Técnicas de modulación

Las técnicas de modulación determinan las características fundamentales de la señal sinusoidal generada por el convertidor a partir de la fuente de alimentación de continua cuando opera como inversor, tales como la frecuencia y la amplitud. Con la modulación se determina la secuencia y orden en que los IGBTs deben ser activados correctamente para lograr la conversión DC/AC. A la hora de elegir entre los diversos algoritmos de modulación se considera aspectos como las pérdidas por conmutación, la eficiencia de la conversión o el contenido armónico presente en la onda de salida [19] [20].

La opción implementada en este caso es la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM), que logra buenos resultados generales respecto al contenido armónico de la operación del convertidor [21]. Cabe precisar que como se demuestra en la referencia [22], este tipo de modulación presenta una serie de limitaciones a la hora de afrontar casos reales muy desfavorables, como hacer frente a un armónico próximo a la frecuencia fundamental, sin embargo dichas circunstancias no son el objeto de estudio en este análisis.

La técnica de modulación utilizada busca obtener una onda puramente sinusoidal mediante el cierre y apertura de los interruptores, pero su velocidad es una limitación física que provoca fenómenos tales como los armónicos. Para solucionar este problema se busca modificar la señal de salida del convertidor, logrando armónicos con frecuencias bastante elevadas y aumentando de este modo la eficacia de un filtro pasivo paso bajo. La frecuencia de conmutación queda determinada por el nivel de pérdidas por conmutación y la velocidad de los semiconductores [23].

Entre los principales modelos por modulación por ancho de pulso (PWM), destacan:

- Modulación basada en la portadora (CB-PWM), en este proyecto se ha optado por esta opción.
- Modulación basada en vectores espaciales (SV-PWM).

Las técnicas de modulación PWM se basan en el principio de balance voltio-segundo, donde el ciclo de trabajo del tren de pulsos generado queda definido por la comparación de amplitudes de una señal denominada moduladora o de referencia a la frecuencia fundamental y la señal portadora, a una frecuencia más elevada correspondiente a la de conmutación [19].

La señal moduladora contiene la información de la amplitud, frecuencia y fase deseadas y por esta razón se conoce también como señal de referencia, además de que es la producida por el control, en este caso es sinusoidal por el método empleado [19]. Mientras que la señal portadora es periódica y presenta distintas características, como se muestra en la Figura 2.16. La forma más común es la triangular, como ocurre en este proyecto [24].

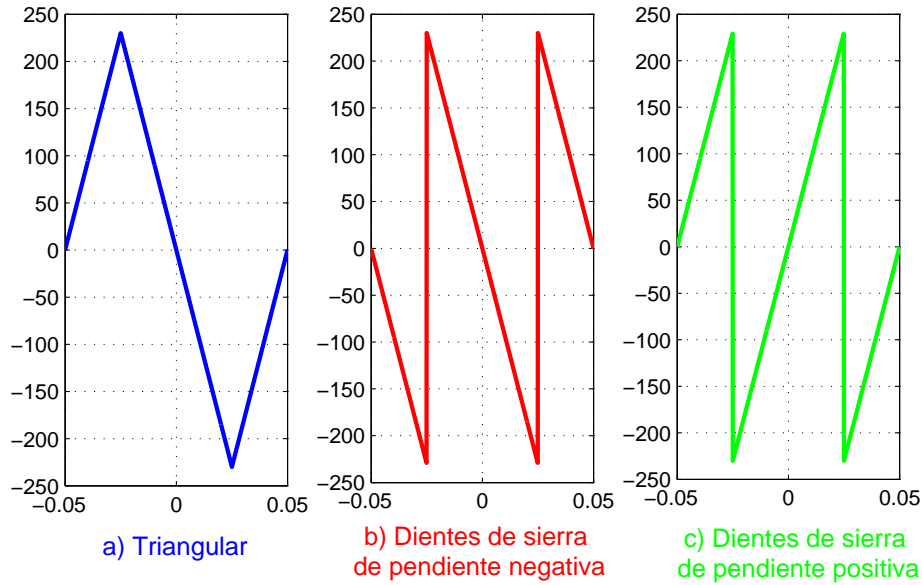


Figura 2.16. Clases de señales portadoras [19]

Dentro de las distintas clases de conmutación, destacan la bipolar y la unipolar. En el primer caso, se produce la siguiente comparación:

$$V_o = +V_{DC} \text{ si } V_{mod} > V_{port}$$

$$V_o = -V_{DC} \text{ si } V_{mod} < V_{port}$$

Ambos límites son la magnitud de la tensión de la etapa continua, variando exclusivamente en la polaridad, es el motivo por el que se denomina conmutación bipolar. En la Figura 2.17 se observa un ejemplo ilustrativo utilizando la frecuencia fundamental de 60 Hz y la tensión del condensador de 230 V mostrados en el Apéndice A [25].

La conmutación unipolar se diferencia de la bipolar exclusivamente en el límite inferior que será nulo, pero el valor máximo en su defecto seguiría siendo $+V_{DC}$, por lo tanto en esta ocasión:

$$V_o = +V_{DC} \text{ si } V_{mod} > V_{port}$$

$$V_o = 0 \text{ si } V_{mod} < V_{port}$$

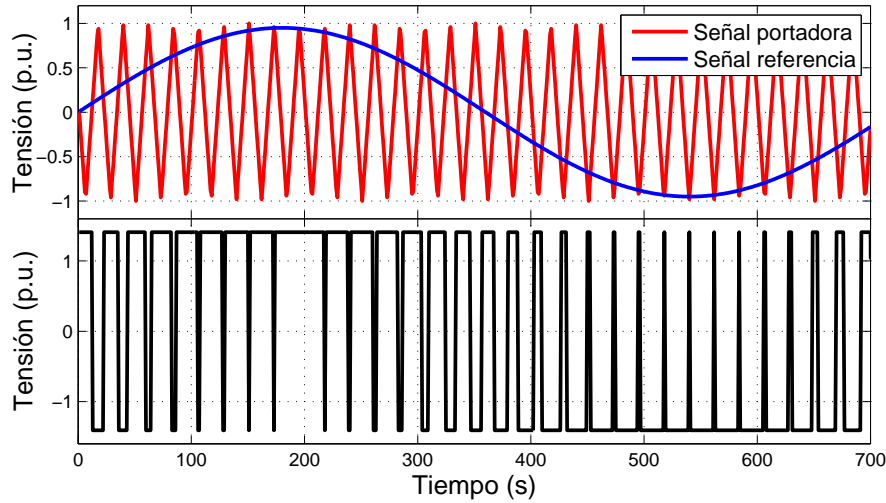


Figura 2.17. Modulación bipolar [25]

Los parámetros claves de la modulación son [19] [20]:

- El índice de modulación de la frecuencia que relaciona las frecuencias de la señal portadora y moduladora, el cual quedaría definido mediante la expresión:

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{moduladora}}$$

Dicho coeficiente es un indicador del orden de la frecuencia de conmutación empleado para la portadora respecto a la de referencia. Un valor elevado genera una onda más próxima a la buscada, porque aumenta la cantidad de armónicos eliminados por el filtro. Otro aspecto importante es la elección de un índice de modulación múltiplo de tres e impar, debido a que favorecería la eliminación de los armónicos homopolares generados que presentan dicha condición [26].

- El otro factor a considerar es el índice de modulación de la amplitud (m_a) que relaciona la amplitud de la señal moduladora y la portadora, cuya expresión es:

$$m_a = \frac{V_{m,moduladora}}{V_{f,portadora}}$$

Para este tipo de modulación mientras su valor sea inferior a la unidad ($m_a \leq 1$), la modulación es lineal y el valor pico de la moduladora no sobrepasa al de la portadora, siendo el modo de funcionamiento correcto. Pero en el caso de que dicho índice supere la unidad ($m_a > 1$), el valor pico de la señal moduladora superaría al de la portadora, produciéndose el fenómeno denominado sobremodulación. Como se observa en la Figura 2.18, en la sobremodulación se produce la pérdida de pulsos y se pierde la relación lineal entre el índice de modulación y la amplitud de la tensión del convertidor, imposibilitando el control de la corriente inyectada a la red [19].

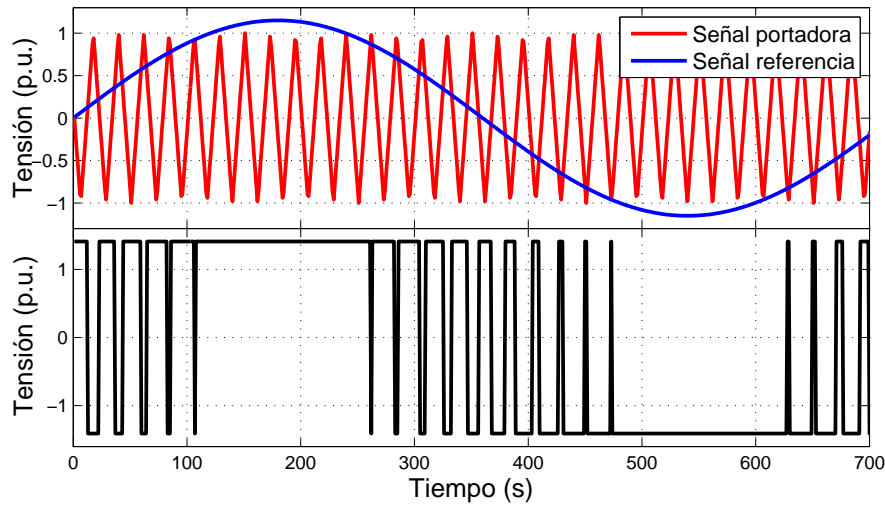


Figura 2.18. Sobremodulación [25]

En los próximos capítulos, siempre que se emplee el término del índice de modulación, se corresponde al de la amplitud. Dado que es el factor relevante a la hora de determinar la magnitud de la tensión de salida del convertidor.

2.3.4. Dimensionamiento del STATCOM

El dimensionamiento del convertidor es un aspecto relevante determinado por las limitaciones físicas de sus componentes. A raíz de la información ofrecida en la referencia [26], se plantea un análisis del problema en cuestión.

Una vez establecido el análisis del rango de potencia activa o reactiva, que debe suministrar el convertidor en función de la aplicación a la que se destine, se debe tomar la decisión sobre la elección idónea de elementos como los IGBTs o el condensador de la etapa de continua.

Es importante remarcar que si el estudio de las potencias transferida se establece desde el punto de vista del rango de operación del STATCOM, la potencia activa que proporciona o absorbe en régimen permanente debe ser nula, al no emplearse un sistema de almacenamiento y mantenerse la tensión del condensador en un valor constante debido al control implementado. Exceptuando las variaciones producidas en la tensión de la etapa de continua (V_{DC}), ante perturbaciones o cambios de consigna de la potencia reactiva, que producen una cierta potencia activa en un intervalo de tiempo tan reducido como la respuesta dinámica del convertidor.

Sin embargo, si fijamos el estudio de la transferencia de potencia activa y reactiva desde el PCC, se estimaría una cierta potencia activa suministrada por la red para subsanar las pérdidas del convertidor o la componente resistiva del filtro y del transformador.

Establecer correctamente los límites de funcionamiento del convertidor en la región del plano P-Q, favorece evitar el desgaste o el deterioro de los elementos que lo constituyen, incluso en el peor caso la rotura. Las dimensiones de la región de funcionamiento se encontrarán determinadas o condicionadas principalmente por [26]:

- La tensión de salida del convertidor en el lado de alterna (V_{vR}), la cual como se estudia en la sección 2.3.3 presenta una relación directa con la tensión de la etapa de continua (V_{DC}), mediante el índice de modulación de la amplitud (m_a).
- La tensión soportada por los propios semiconductores del convertidor, los cuales pueden llegar a lograr a soportar 3.3 kV e incluso se ha anunciado la aparición de nuevos IGBTs de tecnología NPT con tensiones máximas de 6,5 kV [18]. Esta elevada tolerancia provoca que generalmente los IGBTs no sean un limitante en lo que respecta a su tensión.
- La corriente máxima soportada por los semiconductores evitando superar los límites térmicos establecidos por el fabricante. Además se debe valorar el máximo tolerado por los elementos que conectan la red con el convertidor, aunque no son puntos del análisis principal, dado que la primera condición es la más restrictiva.

Para construir el diagrama de los límites de funcionamiento del convertidor trifásico, se partirá del diagrama fasorial correspondiente al circuito equivalente simplificado representado en la Figura 2.19.

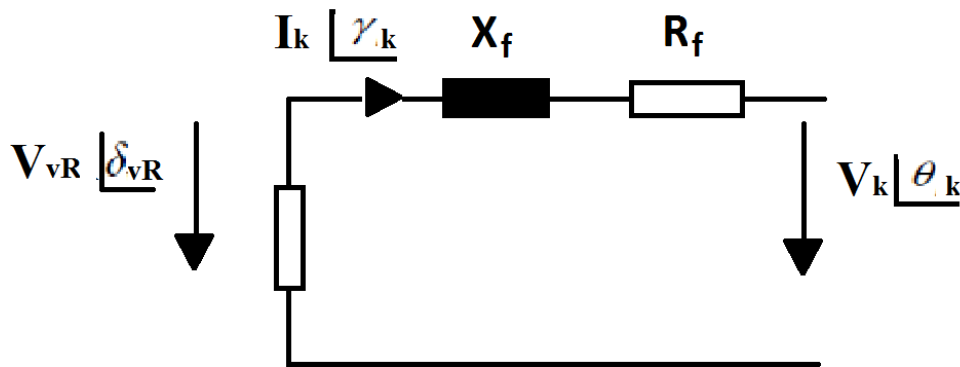


Figura 2.19. Circuito equivalente monofásico para la tensión de salida del inversor [26]

Dónde:

- V_{vR} : Valor eficaz de la tensión de fase de la salida del convertidor.
- δ_{vR} : Ángulo de fase de la tensión de salida del convertidor.
- I_k : Valor eficaz de la intensidad de salida del convertidor.
- γ_k : Ángulo de fase de la intensidad de salida del convertidor.
- V_k : Valor eficaz de la tensión del PCC.

- θ_k : Ángulo de fase de la tensión del PCC.
- R_f : Resistencia de los elementos de la conexión entre la red y el convertidor, tales como el filtro y el transformador.
- X_f : Reactancia de los elementos de la conexión entre la red y el convertidor, tales como el filtro y el transformador.

La expresión de la potencia reactiva y absorbida queda expresada en (2.12) [13] [26].

$$P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_k^2}{X_f}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_k \cdot V_{vR_{max}}}{X_f}\right)^2 \quad (2.12)$$

Los puntos disponibles de operación del convertidor están determinados por la combinación de dos restricciones fundamentales:

1. La primera restricción es la máxima tensión de salida del convertidor posible (V_{vR}) con la que se evita la sobremodulación, para asegurar un correcto funcionamiento como se analizó en el punto 2.3.3. Para ello se analiza la relación de esta con la tensión de la etapa de continua (V_{DC}), mediante el índice de modulación (m_a) para la modulación SPWM expresado en la ecuación (2.13) [19] [26].

$$m_a = \frac{2 V_{vR_{fase}}^{pico}}{V_{DC}} \quad (2.13)$$

2. La segunda restricción es la de no sobrepasar en régimen permanente la máxima corriente soportada por los semiconductores. Se emplea en su análisis la relación de la máxima potencia aparente y la magnitud de la máxima intensidad permitida, obteniendo la expresión (2.14) [26].

$$P^2 + Q^2 = (3 \cdot V_k \cdot I_{max}^2) \quad (2.14)$$

Los puntos de operación seguros vienen definidos por la intersección de los círculos que describen dichos límites físicos, como se muestra en la Figura 2.20, donde se establece la relación entre las tensiones del sistema y las potencias proporcionadas por el convertidor [13]. Algunas consideraciones relevantes de esta representación son:

- La proyección del eje directo representa la potencia reactiva entregada a la red, cuando actúa como inversor y el eje de cuadratura, representa la potencia activa.
- Se emplea una constante para lograr una representación del diagrama fasorial del esquema de la Figura 2.20, donde se observa que el límite establecido de la potencia está directamente relacionado con el módulo de la caída de tensión que se produce en la reactancia $X_f I_k$. Dicha constante es:

$$k = \frac{X_f}{3 \cdot V_k}$$

- Puesto que el STATCOM no suministra potencia activa, se ha representado con una línea roja el rango de operación real de este caso. El punto de operación de $Q_{vR_{max}}$ para $P_{vR} = 0$, como se observa lo impone el límite más restrictivo.

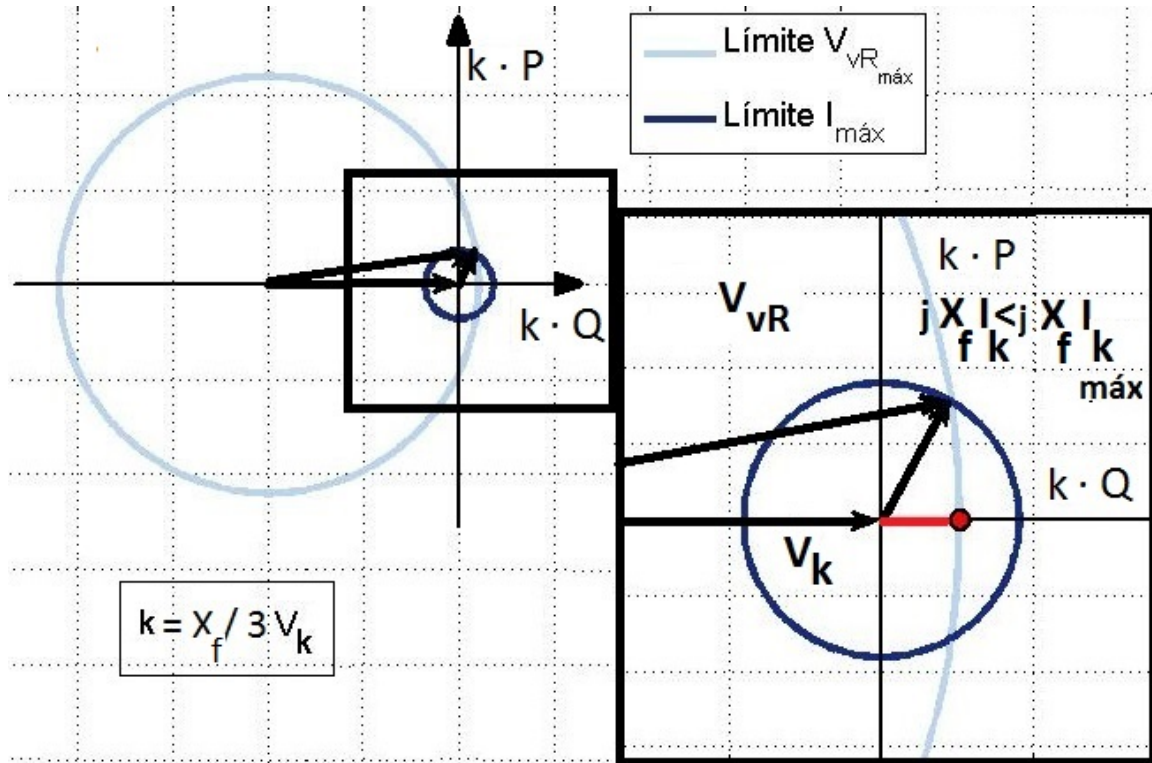


Figura 2.20. Región de operación del convertidor [13]

Otro aspecto importante del dimensionamiento del STATCOM es la influencia de los principales elementos del sistema en su capacidad de transferir potencia reactiva, destacando [26]:

- La tensión de la etapa de continua.
- La reactancia equivalente de los elementos empleados en la conexión a la red.

Todos los planteamientos o resultados expresados en magnitudes por unidad se han obtenido a partir de los valores base presentados en el Apéndice B.

Para analizar la influencia de la tensión de la etapa de continua en la capacidad del STATCOM de suministrar potencia reactiva, se establece un estudio donde se considera conocidos tanto la reactancia de la conexión a la red como la tensión de esta:

- La tensión de red es el valor: $v_k = 1$ (p.u.).
- La reactancia de conexión a la red es el valor: $x_f = 0,182$ (p.u.) .
- Se considera que el inversor actúa como compensador de reactiva, y la potencia activa es nula: $p = 0$ (p.u.).

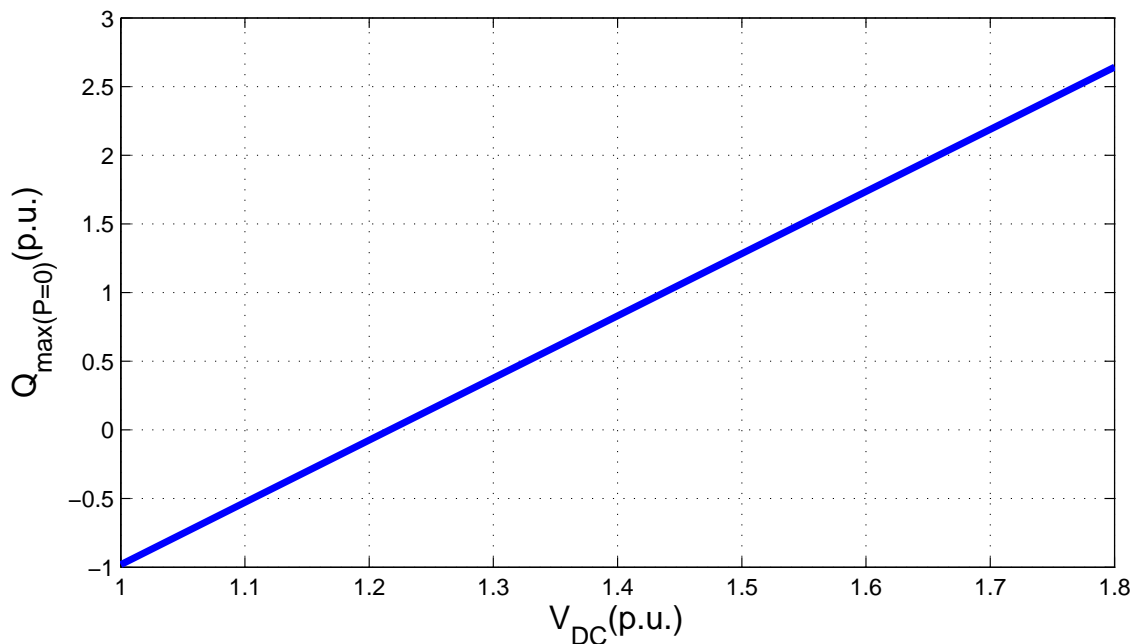


Figura 2.21. Influencia de la tensión del condensador en la potencia reactiva máxima proporcionada por el inversor [26]

El estudio de como varía la máxima potencia reactiva capaz de inyectar el STATCOM en función de los valores de la tensión de la etapa de continua (V_{DC}) que se muestra en la Figura 2.21, refleja que existe una relación directamente proporcional entre ambas magnitudes. El empleo de un condensador de mayores dimensiones aumentaría la flexibilidad del convertidor para responder a perturbaciones producidas por cargas más grandes, sin embargo no solo supondría una inversión inicial superior sino que además obligaría a emplear semiconductores capaces de soportar dicha tensión, lo que se traduce en otro porcentaje de presupuesto adicional [26].

Para analizar la influencia de la reactancia equivalente de los elementos empleados en la conexión al PCC en la máxima potencia reactiva suministrada por el STATCOM, se realiza un análisis donde ahora se considera conocidos la tensión del PCC y la tensión de la etapa de continua:

- La tensión de red se fijará en el valor: $v_k = 1$ p.u..
- La tensión de la etapa de continua: $v_{DC} = 1,41$ p.u..
- Se considera que el inversor actúa como compensador de reactiva, y la potencia activa es nula: $p = 0$ p.u..

La relación de dicha reactancia con la máxima potencia reactiva inyectada como se observa en la Figura 2.22 es inversamente proporcional, sacrificando un porcentaje de potencia resaltable al emplear elementos de dimensiones superiores en la conexión a la red. En el caso del filtro paso bajo empleado, el objetivo final será elegir el más pequeño capaz de eliminar la distorsión armónica de la modulación, evitando una reducción considerable de la capacidad del STATCOM.

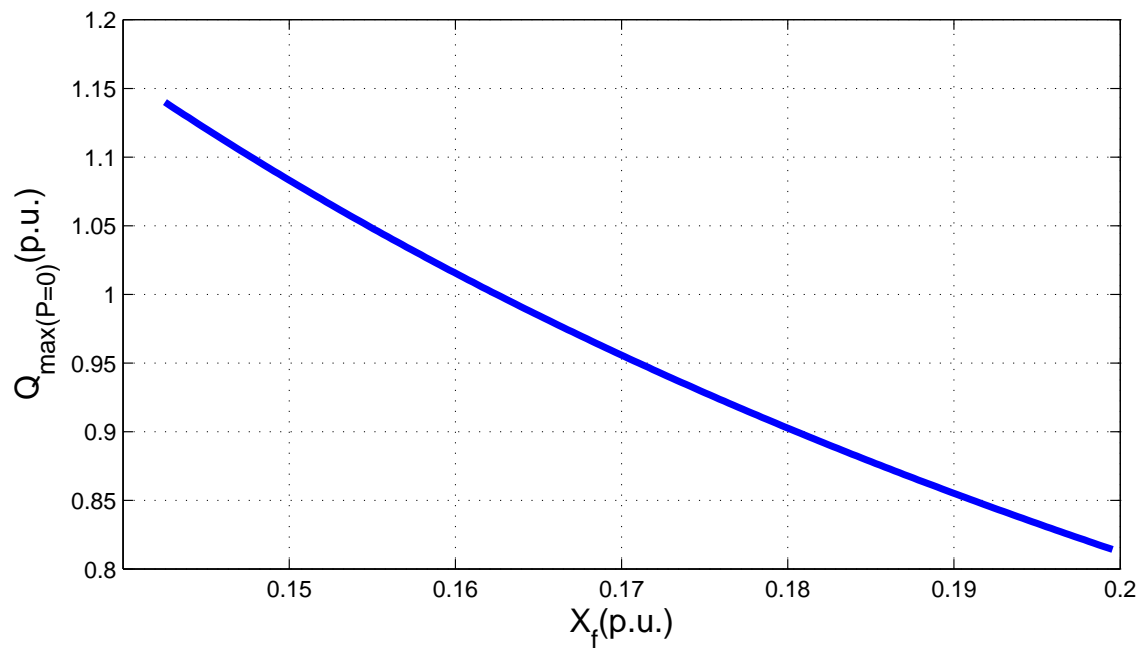


Figura 2.22. Influencia de la reactancia equivalente de los elementos empleados en la conexión al PCC en la potencia reactiva máxima proporcionada por el inversor [26]

Capítulo 3

Modelado y Control vectorial del STATCOM

El siguiente capítulo analiza el modelo matemático y la implementación del control del STATCOM conectado al sistema eléctrico, como se se observa en la Figura 3.1. Los parámetros de los elementos del circuito aparecen listados en el Apéndice A, mientras que los valores base empleados se corresponden al Apéndice B.

La estructura del capítulo se conforma del apartado 3.1 donde se muestra la transformación empleada para representar las variables en el sistema de referencia d-q-o, mientras que en el punto 3.2 se analiza el lazo de seguimiento de fase y su incidencia en la sincronización de la frecuencia de las variables del control con la planta del sistema. El modelo matemático del funcionamiento del STATCOM conectado a la red será estudiado en el punto 3.3. La sección 3.4 analiza la implementación de los límites físicos a raíz de los conceptos teóricos analizados en el punto 2.3.4.

El apartado 3.5 se enfocará en mostrar la estructura de los reguladores empleados en el control y el punto 3.6 analiza el ajuste de las componentes integral y proporcional para los distintos lazos del control. En la sección 3.7 se explicará la repercusión del efecto windup y la implementación de los anti-windup.

El convertidor en la mayoría de las representaciones mostradas en secciones y capítulos posteriores, actúa como si se tratase de una fuente de tensión alterna promediada dependiente del control, operando en el dominio del tiempo continuo. Dicha decisión se basa en la elaboración de un análisis claro y conciso de cada uno de los elementos que conforman el esquema general, dedicando el estudio de cuestiones específicas como la modulación exclusivamente al apartado 3.8. En dicha sección se analiza la implementación de la modulación sinusoidal por ancho de pulsos (SPWM) utilizada en el convertidor real, a partir de los conceptos planteados en el punto 2.3.3.

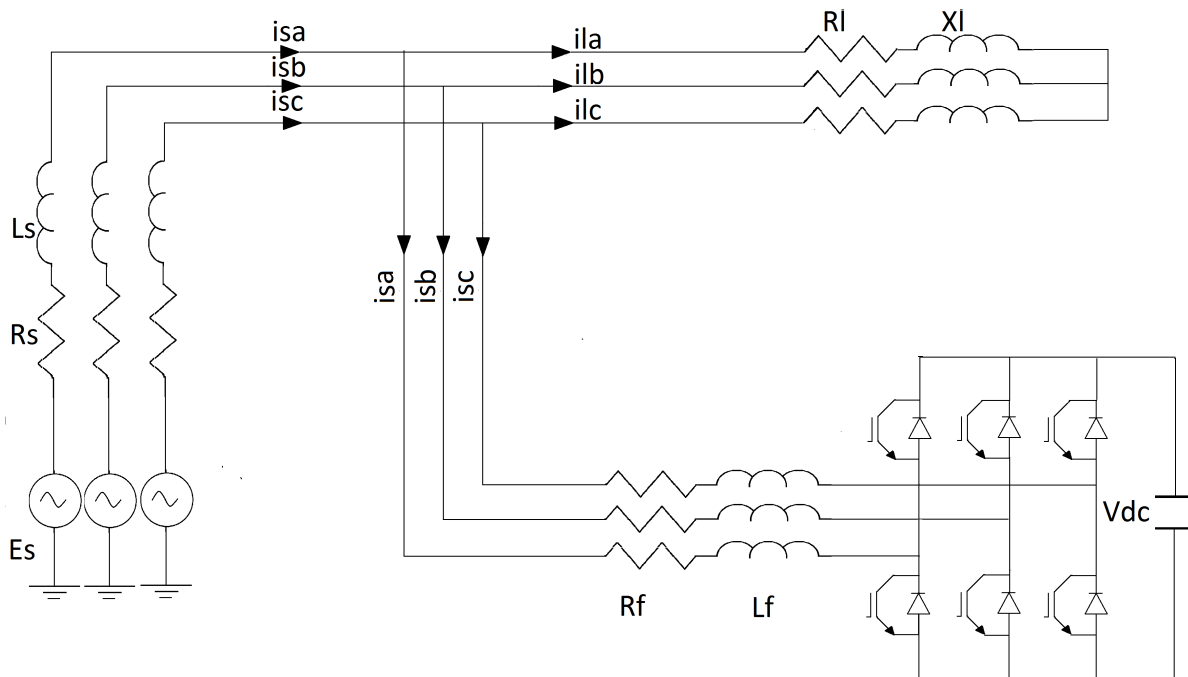


Figura 3.1. Esquema del caso de estudio [12]

El control se conforma de una serie de bloques anidados, los cuales se presentan en la Figura 3.2 respetando el siguiente código numérico:

1. Control del valor eficaz de la tensión del nudo local, al que se conecta el STATCOM.
2. Control de la corrección del factor de potencia.
3. Control de la tensión de la etapa de continua.
4. Control de la intensidad del STATCOM.
5. Lazo de seguimiento de la fase (PLL).
6. Bloque generador de la modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM).

Como se expuso en el punto 1.2, los principales problemas a los que el STATCOM ofrece solución son corregir el factor de potencia y regular la tensión del PCC [3]. Ambas funciones son mutuamente excluyentes y esta realidad queda reflejada en la Figura 3.2, a la hora de elegir entre el primer y segundo bloque.

En este capítulo se presentará las implementaciones del modelo a través del programa informático Matlab/Simulink® y con simulaciones que verifiquen los conceptos planteados. Dicha herramienta informática proporciona la posibilidad de realizar estudios físicos con poca inversión y sin riesgo de rotura o desgaste de los componentes o dispositivos empleados.

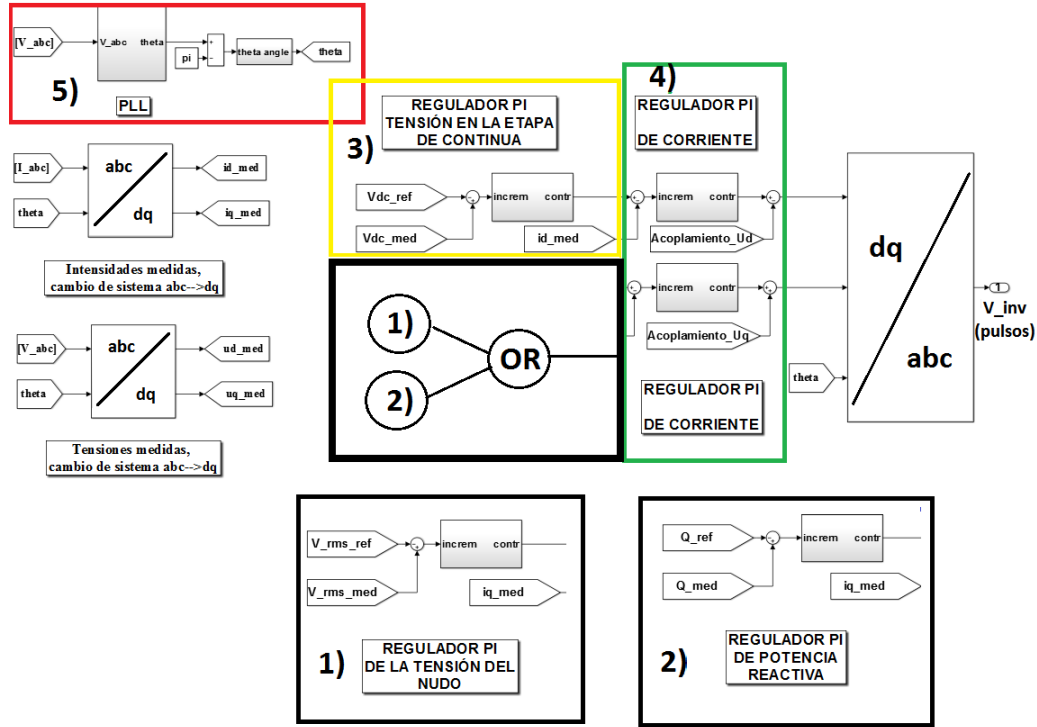


Figura 3.2. Esquema general del control del STATCOM

3.1. Transformación al sistema de referencia d-q-o

En este proyecto para ejercer el control de la intensidad y la tensión de red sobre el sistema de referencia síncrono constituido por los tres ejes ortogonales d-q-o, se ha aplicado las transformadas de Clarke y Park definidas en la expresión (3.1) [27] [28], analizadas en el Apéndice C. Donde la constante $\frac{2}{3}$ permite que el valor máximo del vector espacial sea igual al valor máximo de las tensiones o corrientes instantáneas.

$$[T_\theta] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La potencia activa y la potencia reactiva instantáneas expresadas en dichos ejes se define del siguiente modo:

$$P = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) = \frac{3}{2}|v||i|\cos\phi \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}) = \frac{3}{2}|v||i|\sin\phi \quad (3.3)$$

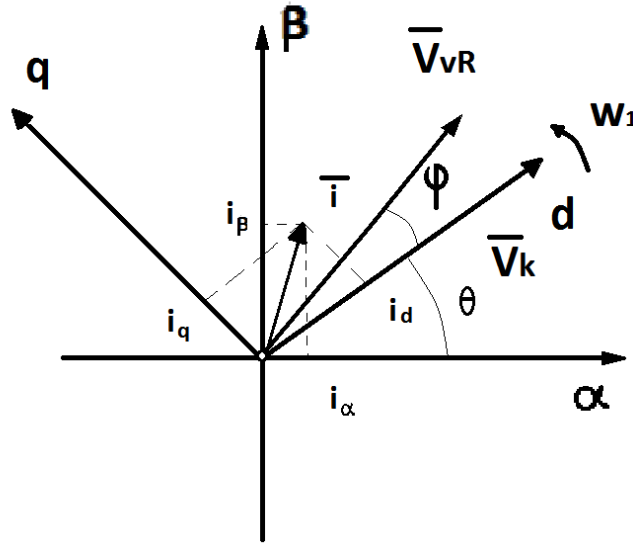


Figura 3.3. Representación de los fasores del sistema en el plano $\alpha - \beta$ y en el plano d-q [29]

En la Figura 3.3 se muestra los fasores del sistema referido a los ejes $\alpha - \beta$ y a los ejes d-q. Donde θ es el ángulo del fasor de la tensión de la red con el eje real del sistema de referencia estacionario. Como se observa en dicha representación, el vector tensión del PCC (\vec{V}_K) coincide con el eje directo (d), mientras que la componente de dicho vector en el eje de cuadratura (q) es nula [29]. Así pues los vectores de la tensión e intensidad quedan definidos en los ejes de referencia d-q como:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [c]^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [c]^{-1} \begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

La potencia activa y reactiva se simplificarían sobre los ejes de referencia d-q del siguiente modo:

$$P = \frac{3}{2} |v| i_d \quad (3.6)$$

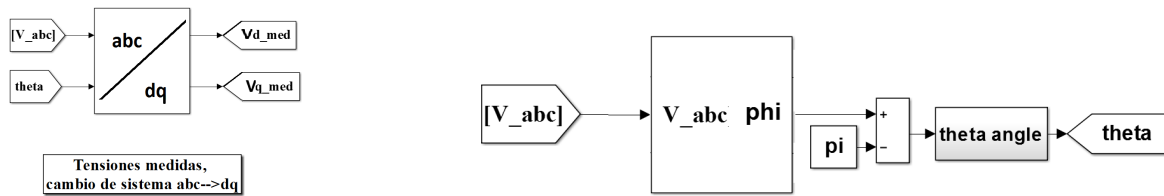
$$Q = -\frac{3}{2} |v| i_q \quad (3.7)$$

La potencia reactiva que se inyecta a la red depende exclusivamente de la componente de cuadratura de la intensidad, mientras que la componente del eje directo define la potencia activa, logrando un ventajoso control independiente de ambas variables.

3.2. Lazo de seguimiento de fase, PLL

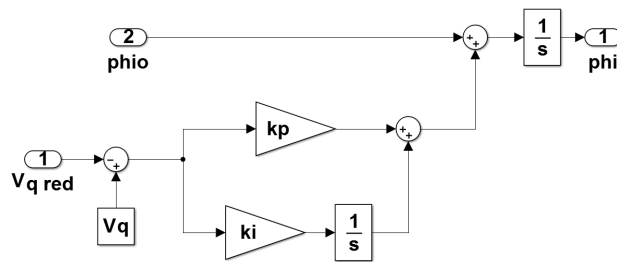
La teoría general del lazo de seguimiento de fase (PLL) y de la opción implementada para las características de este sistema, el SRF-PLL queda analizado en el Apéndice D. Esta técnica se apoya en un sistema de referencia síncrono, sobre el cual se proyecta el vector de la tensión de red.

A raíz de la medida de la señal del vector tensión del punto de conexión a la red trifásica (PCC) y el bloque de transformación abc/dq del esquema general de control del STATCOM que se muestra en la Figura 3.4 (a), se obtiene las componentes en el sistema de referencia d-q. La posición angular del SRF-PLL se modifica coincidiendo con el ángulo de fase del vector de tensión del PCC, logrando la sincronización de las frecuencias de las variables fundamentales. La implementación del bloque PLL mostrado en la Figura 3.4 (b) consiste en un regulador PI (proporcional-integral), como se observa en la Figura 3.4 (c) [30].



(a) Transformación abc/dq

(b) PLL



(c) Implementación del PLL

Figura 3.4. Bloques del esquema general del control del STATCOM

3.3. Ecuaciones de la planta del sistema

El modelo de la planta del sistema se compone del convertidor en fuente de tensión y los elementos de conexión, resaltando el filtro, implementados en Simulink mediante la librería Powerlib de Simpowersystem, como se muestra en la Figura 3.5. El elemento del convertidor es remarcado para indicar que opera como una fuente de tensión alterna promediada dependiente del control en la mayoría de las implementaciones posteriores.

Las variables de estado de dicho circuito serán las intensidades y las tensiones. Las ecuaciones del modelo matemático que describen el funcionamiento del sistema [26] [29], quedan expresadas en el sistema de referencia d-q-o y son válidas indistintamente de si el convertidor opera como inversor o rectificador, cambiando exclusivamente el signo de las intensidades.

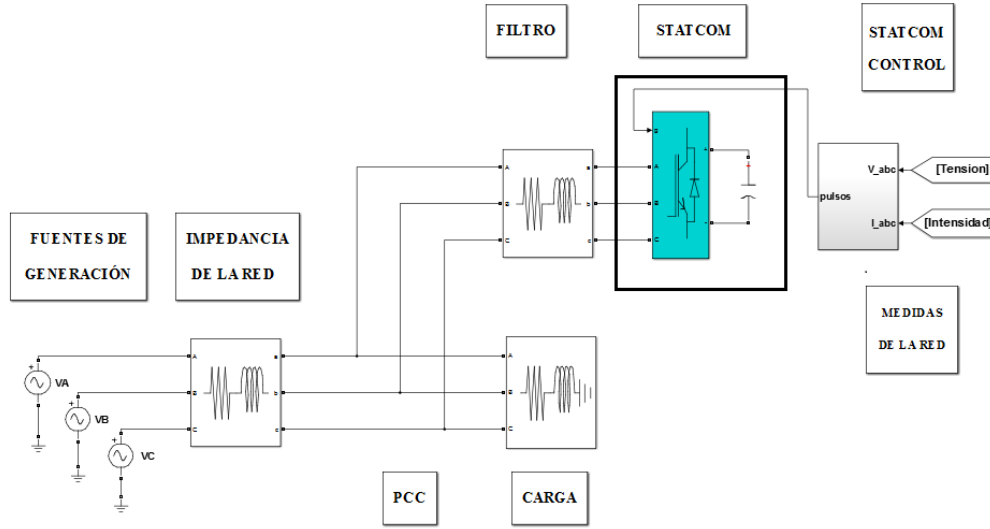


Figura 3.5. Esquema del circuito general implementado en Simulink

La nomenclatura empleada es idéntica a la del Capítulo 2 y sus valores se presentan en el Apéndice A. Las ecuaciones de las variables de fase de la caída de tensión de alterna del convertidor, quedan definidas por su equivalente Thevenin, como:

$$\begin{bmatrix} v_{vR_a} \\ v_{vR_b} \\ v_{vR_c} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{k_a} \\ v_{k_b} \\ v_{k_c} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Considerando la definición del fasor espacial del vector tensión de la red:

$$\vec{v}_k^{\alpha\beta} = v_{k_a} + v_{k_b} e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_{k_c} e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (3.9)$$

$$\vec{v}_k^{\alpha\beta} = \vec{v}_{vR}^{\alpha\beta} - R_f \vec{i}_k^{\alpha\beta} - L_f \frac{d\vec{i}_k^{\alpha\beta}}{dt} \quad (3.10)$$

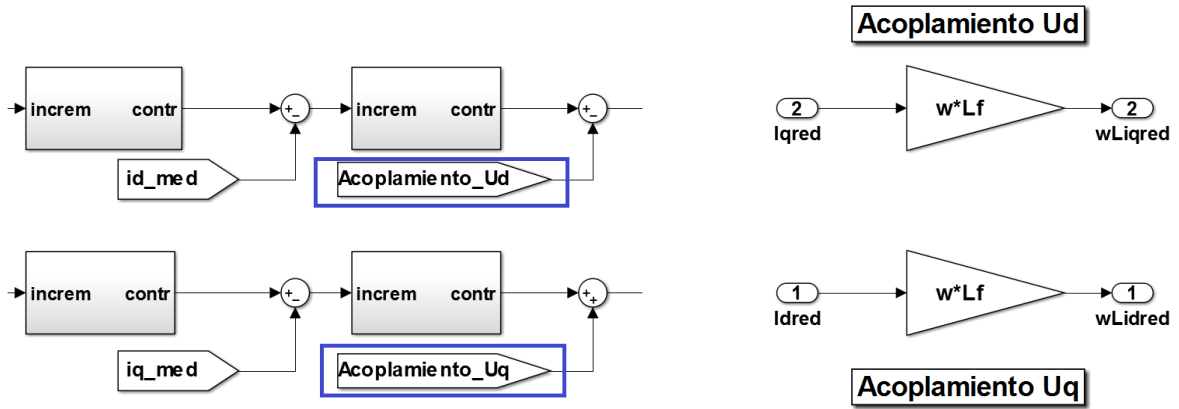
Mediante la transformada de Clarke y Park definidas en el Apéndice C se logra la representación del sistema trifásico proyectados sobre los ejes d y q, expresados en las formulas (3.12) y (3.13) [26] [29].

$$\vec{v}_k^{dq} = \vec{v}_{vR}^{dq} - R_f \vec{i}_k^{dq} - L_f \frac{d\vec{i}_k^{dq}}{dt} - jL_f \omega \vec{i}_k^{dq} \quad (3.11)$$

$$v_k^d = v_{vR}^d - R_f i_k^d - L_f \frac{di_k^d}{dt} + jL_f w i_k^q \quad (3.12)$$

$$v_k^q = v_{vR}^q - R_f i_k^q - L_f \frac{di_k^q}{dt} - jL_f w i_k^d \quad (3.13)$$

El fasor de la tensión de la red (\vec{v}_k) coincide con el eje directo (d), mientras que las componentes $jL_f w i_k^q$ y $-jL_f w i_k^d$ son los denominados términos de acoplamiento. Dichas componentes suponen que cualquier cambio de consigna en el eje directo tiene un efecto indeseado en el eje de cuadratura y viceversa, impidiendo la ventaja del control vectorial de desacoplar las magnitudes en cada eje. Por esta razón, como se observa en la Figura 3.6 (a) del esquema general de control, son eliminados para lograr el desacople de ambos ejes deseado.



(a) Términos del acoplamiento en el esquema del circuito general

(b) Implementación de los terminos de acoplamiento

Figura 3.6. Explicación de la representación de los acoplamientos en Simulink

A la hora de estudiar la etapa de continua del convertidor, se considera exclusivamente la intensidad y la tensión en el condensador y se desprecia las pérdidas del propio dispositivo, lo que no supone una variación significativa de los resultados.

La potencia del lado de alterna del convertidor es la misma que la de la etapa de continua, con la consideración de definir las pérdidas del convertidor como nulas [31]. La potencia activa de la etapa de continua queda definida en las ecuaciones (3.14) y (3.15) [32]. En la Figura 3.7 (a) se muestra la representación de esta expresión mediante bloques Simulink. Donde C_{DC} es el condensador de la etapa de continua.

$$P_{DC}^{dq} = P_{AC}^{dq} = \frac{3}{2} v_k^d i_k^d \quad (3.14)$$

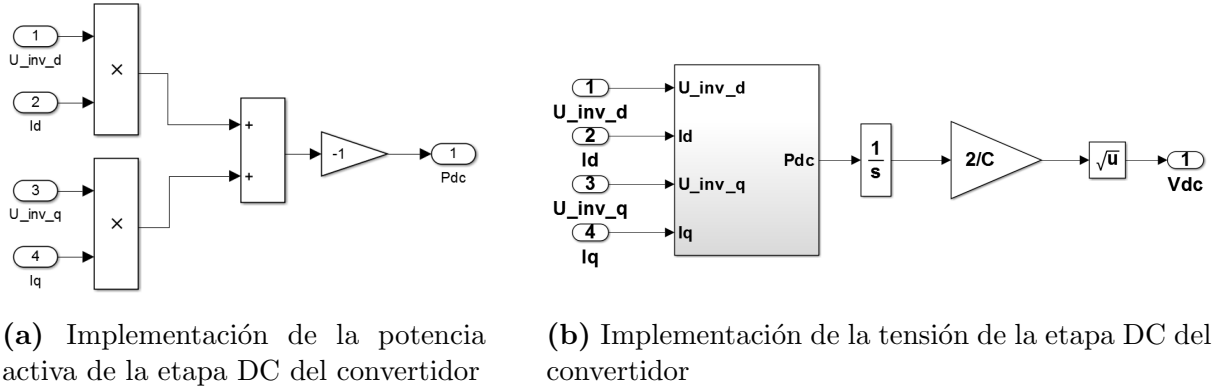


Figura 3.7. Implementación de la etapa de continua (DC) en Simulink

$$P_{DC} = -V_{DC} I_{DC} = -V_{DC} (C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt}) \quad (3.15)$$

La implementación en Simulink presentada en la Figura 3.7 (b) se corresponde a la obtención de la tensión de la etapa de continua mediante la ecuación de la energía (3.16).

$$W_{DC} = - \int P_{DC} = \frac{1}{2} C_{DC} \frac{dV_{DC}^2}{dt} \quad (3.16)$$

3.4. Implementación de los límites físicos

La implementación de los límites físicos se fundamenta en el análisis planteado en la sección 2.3.4, sin embargo debido al elevado número de grados de libertad en la dinámica del circuito, como se analizó en el punto 2.2.2, se deberá establecer una serie de aproximaciones para dichos límites.

Un cálculo idóneo debería considerar las pérdidas estacionarias, sin embargo en el caso analizado se han despreciado para evitar aumentar su complejidad. Dicha energía se compone de [31]:

- Las pérdidas del condensador por la variación de tensión, producto de su descarga o carga ante las perturbaciones del sistema.
- Las pérdidas en la conmutación y encendido de los interruptores del convertidor.
- Las pérdidas de conducción.

Como se expuso en la sección 2.3.4, los límites del STATCOM son la intensidad de los IGBTs (I_k) y la tensión de salida del STATCOM (V_{vR}). En este caso, se ha optado por implementar dichas restricciones, pero un camino alternativo es determinar los valores del índice de modulación (m_a) y el ángulo de fase, los cuales están relacionados con la corriente y la tensión de continua (V_{DC}) [31].

Sin embargo, existe otros parámetros que requieren una definición constante y dificultan establecer los límites exactos de las magnitudes comentadas, destacando:

1. El ángulo de fase de la tensión de salida del STATCOM (δ_{vR}).
2. El ángulo de fase de la tensión del punto de unión a la red (θ_k).

Dichos factores producen complicaciones debido a que la relación $\theta_k - \delta_{vR}$, determina el flujo de energía entre el convertidor y el PCC [32]. Generalmente se suele emplear la aproximación $\theta_{k_o} = \delta_{vR_o}$, donde θ_{k_o} es el ángulo de fase inicial de la tensión del PCC cuando el STATCOM no entrega potencia activa. Sin embargo, los valores obtenidos serían una aproximación cercana a la realidad, puesto que realmente existe una potencia activa suministrada por la red para solventar las pérdidas del filtro, del transformador y del propio convertidor, así que en la práctica es necesario un valor aproximado de δ_{vR} .

A raíz de la expresión (2.13) en el punto 2.3.4 y considerando que se ha establecido un índice de modulación inferior a la unidad, para evitar la sobremodulación ante perturbaciones o cambios de consignas severas, los valores empleados son:

- $m_a = 0.95$
- $V_{DC} = 230$ [V]

El máximo valor pico de la tensión de fase del inversor posible ($V_{vR_{max}}$) en dichas condiciones sería 109.25 V, mientras que en su defecto el término mínimo se establecerá en un valor nulo. Es necesario resaltar que la eliminación de los términos de acoplamiento que se definió en el punto 3.3, ejercen un efecto en los reguladores de intensidad que deberá ser considerado y analizado adecuadamente para definir los límites de la tensión.

A la hora de establecer los límites operacionales de la intensidad, primero se debe establecer una relación directa entre sus componentes directa y de cuadratura. En primera instancia atendiendo a la ecuación (2.14) en el punto 2.3.4.

$$P^2 + Q^2 = (3 \cdot I_{max} \cdot V_k)^2 \quad (3.17)$$

Desarrollando las potencias de la expresión (3.17) y considerando que la componente de cuadratura de la tensión en el PCC es nula, se establece la ecuación (3.18) y mediante simplificaciones se obtiene la expresión (3.19) [13] [33].

$$\left(\frac{3}{2} \cdot I_d \cdot V_{k_d}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} \cdot I_q \cdot V_{k_d}\right)^2 = (3 \cdot I_{max} \cdot V_{k_d})^2 \quad (3.18)$$

$$I_d^2 + I_q^2 = (2 \cdot I_{max})^2 \quad (3.19)$$

Por otro lado, empleando la ecuación de los límites de funcionamiento en los ejes P/Q mostrada en (2.12) de la sección 2.3.4 y considerando de nuevo que la componente de cuadratura de la tensión del PCC es nula, se obtiene la ecuación (3.20).

$$\left(\frac{3}{2} \cdot I_d \cdot V_{k_d}\right)^2 + \left(\frac{3}{2} \cdot I_q \cdot V_{k_d} + \frac{3 \cdot V_{k_d}^2}{X_f}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{k_d} \cdot V_{vR_{max}}}{X_f}\right)^2 \quad (3.20)$$

Simplificando la igualdad establecida, se alcanza la ecuación final (3.21).

$$(I_d \cdot V_{k_d})^2 + \left(I_q \cdot V_{k_d} + \frac{2 \cdot V_{k_d}^2}{X_f}\right)^2 = \left(\frac{2 \cdot V_{k_d} \cdot V_{vR_{max}}}{X_f}\right)^2 \quad (3.21)$$

Cabe destacar que en la ecuación solo se considera la componente reactiva de la impedancia equivalente de la conexión a la red (X_f), para considerar el flujo de potencia activa existente, se busca un valor aproximado para la componente directa de la intensidad (I_d). Debido a que el planteamiento anterior se reduciría en una componente directa de la intensidad nula ($I_{q_{max}} = I_{max}$), se estipula la siguiente consideración externa para lograr un carácter más real:

$$I_{q_{max}} = 0,99 \cdot I_{max}$$

Como consecuencia de que el STATCOM, puede operar con carácter inductivo o en su defecto capacitivo según el sentido de la intensidad, se considera que:

$$I_{d_{min}} = -I_{d_{max}}$$

$$I_{q_{min}} = -I_{q_{max}}$$

Los resultados obtenidos de la implementación se resumen en:

LÍMITES ESTABLECIDOS	
$I_{q_{max}} [A]$	70.29
$I_{q_{min}} [A]$	-70.29
$I_{d_{max}} [A]$	10.02
$I_{d_{min}} [A]$	-10.02
$V_{vR_{max}} [V]$	109.25
$V_{vR_{min}} [V]$	0

Tabla 3.1. Límites de la intensidad de circulación y la tensión de salida del convertidor.

3.5. Reguladores PI

Un regulador es un elemento capaz de proporcionar respuestas y soluciones de control válidas y eficaces frente a perturbaciones o problemas del entorno real [34] [35], en este caso el sistema eléctrico. Dichos reguladores pueden constar de tres términos [36]:

- El término proporcional (P) que otorga fuerza y rapidez en la acción de control, pasando la señal de error por una ganancia.
- El término integral (I) que reduce el error estacionario hasta que es nulo, a través de compensaciones de baja frecuencia.
- El término derivativo (D) que mejora la respuesta transitoria a través de la compensación de alta frecuencia.

El uso generalizado del regulador PID, el cual contiene los tres elementos, ha incentivado el número de investigaciones que analizan las ventajas y desventajas de su actuación [37] [36], ofreciendo soluciones a los problemas relacionados con los términos derivativo e integral.

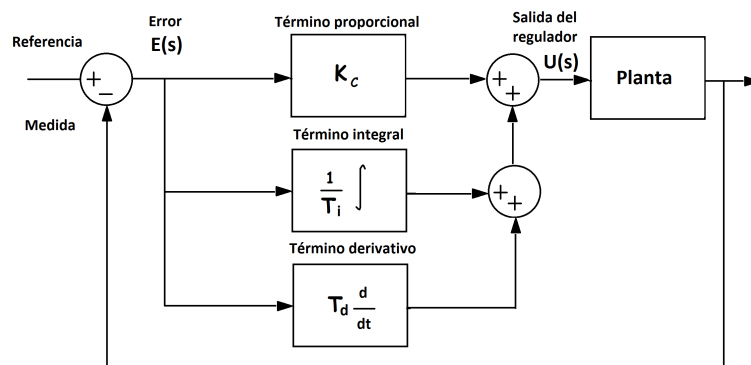


Figura 3.8. Bloque explicativo del regulador PID

La representación gráfica de dicho regulador quedaría definida en la Figura 3.8, mientras que su función de transferencia se corresponde a:

$$G_{PID}(s) = \frac{U_s}{E_s} = k_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s \quad (3.22)$$

Donde:

- $U(s)$: Señal de control.
- $E(s)$: Señal del error.
- k_p : Ganancia proporcional.
- T_i : Constante de tiempo de acción integral.
- T_d : Constante de tiempo de acción derivativa

La idea de que el término derivativo mejora la respuesta transitoria y la estabilidad es errónea, como se demuestra en las referencias [35] [38], ya que dicho término puede reducir o empeorar la estabilidad cuando existe un retardo en las comunicaciones. Esto ha provocado que en muchas investigaciones se haya optado por eliminar el término derivativo, por las propiedades de las variables del sistema que atiende este proyecto se ha considerado idóneo el empleo de reguladores PI. Con esta opción se logra anular el error en régimen permanente y no provocar una lentitud excesiva. La ecuación que describe el comportamiento del regulador PI se define en (3.23) [39].

$$G_{PI} = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{T_n s + 1}{T_i s} \quad (3.23)$$

Donde la constantes se definen como:

$$T_n = \frac{k_p}{k_i} \quad T_i = \frac{1}{k_i}$$

3.6. Ajuste de los reguladores del control

Los planteamientos presentados en esta sección se corresponden al modelo del tiempo continuo. Sin embargo, en el caso de estudiarse el convertidor real empleando la técnica de modulación SPWM, se analizaría el modelo de tiempo discreto. Puesto que opera a partir del ritmo de los pulsos generados por la acción del control, los cuales son instantes discretos de tiempo [40]. La ecuación de la planta en lazo abierto se define como (3.24).

$$G_{la} = G_{PI} \cdot G_{int} \cdot G_{planta} = \frac{T_n s + 1}{T_i s} \cdot \frac{1}{T_{l_{c_{int}}} s + 1} \cdot \frac{\frac{1}{k}}{\tau_{planta} s + 1} \quad (3.24)$$

Donde [39]:

- $G_{la}(s)$ – Planta en lazo abierto.
- $G_{lc}(s)$ – Planta en lazo cerrado.
- $G_{PI}(s)$ – Regulador PI.
- $G_{int}(s)$ – Lazo interno (dinámica rápida).
- $G_{planta}(s)$ – Sistema a regular (dinámica lenta).

3.6.1. Lazo de intensidad

Las constantes proporcional e integral de los reguladores PI son producto de la función de transferencia que representa la planta del sistema, en este caso la conexión del convertidor a la red (PCC).

El método empleado para los parámetros del controlador del lazo de intensidad es el de la cancelación de la mayor constante de tiempo [13] [39]. La respuesta más rápida la proporciona el actuador y por lo tanto, la constante de tiempo del lazo más interno es el periodo de conmutación del convertidor ($\tau_{convertidor}$).

La función de la planta del lazo de intensidad definida en (3.26), se basa en la relación de la tensión de salida del convertidor y la intensidad, expresada en (3.25), a partir de las ecuaciones (3.12) y (3.13). Esta es idéntica tanto para la componente directa como de cuadratura de la corriente.

$$\frac{I_d(s)}{V_d(s)} = \frac{I_q(s)}{V_q(s)} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (3.25)$$

$$G_{planta} = \frac{\frac{1}{k}}{1 + \tau_{planta}s} = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \frac{L_f}{R_f}s} \quad (3.26)$$

Considerando que la mayor constante de tiempo se corresponde a la ecuación de planta, se obtiene la igualdad (3.27), a partir de la que se define la constante T_n en (3.28).

$$T_{n_I}s + 1 = \frac{L_f}{R_f}s + 1 \quad (3.27)$$

$$T_{n_I} = \frac{L_f}{R_f}[s] \quad (3.28)$$

A raíz de dicha cancelación se halla la expresión del lazo abierto (3.29), a partir de la cual se define la ecuación de lazo cerrado (3.30).

$$G_{la} = \frac{\frac{1}{R_f}}{T_{i_I}s(1 + \tau_{conv}s)} \quad (3.29)$$

$$G_{lc} = \frac{G_{la}}{1 + G_{la}} = \frac{\frac{1}{R_f}}{\frac{1}{R_f} + T_{i_I}s \cdot (1 + \tau_{conv}s)} \cong \frac{\frac{1}{R_f}}{\frac{1}{R_f} + T_{i_I}s} = \frac{1}{1 + R_f T_{i_I}s} \quad (3.30)$$

El hecho de que se opere a bajas frecuencias (en este caso 60 Hz), posibilita la aproximación de despreciar el término $T_{i_I}\tau_{conv}s^2$ y obtener la constante de tiempo del lazo cerrado de la intensidad simplificada en la expresión (3.31).

$$T_{lc_{int}} = R_f T_{i_I}[s] \quad (3.31)$$

Si no se desprecia dicho término y se desarrolla la expresión, se alcanza un sistema de segundo orden (3.32), el cual presenta una respuesta semejante a la formula (3.33).

$$G_{lc} = \frac{\frac{1}{R_f}}{\frac{1}{R_f} + T_{i_I}s \cdot (1 + \tau_{conv}s)} = \frac{1}{1 + R_f T_{i_I}s + R_f T_{i_I} \tau_{conv}s^2} \quad (3.32)$$

$$G_{lc} = \frac{k}{1 + 2\frac{\varepsilon}{w_o}s + \frac{s^2}{w_o^2}} \quad (3.33)$$

A raíz de la relación de semejanza entre ambas expresiones (3.32) y (3.33), se presenta un sistema de ecuaciones (3.34) y (3.35), de cuya resolución se observa que el valor correspondiente al parámetro T_{i_I} queda establecido en la ecuación (3.36).

$$w_o = 2\frac{\varepsilon}{R_f T_{i_I}} \quad (3.34)$$

$$R_f T_{i_I} \tau_{conv} = \frac{1}{w_o^2} \quad (3.35)$$

Donde se considera que: $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$T_{i_I} = \frac{2\tau_{conv}}{R_f} \left[\frac{s}{\Omega} \right] \quad (3.36)$$

Utilizando los términos (3.28) y (3.36), se hallan las ganancias que representan el término integral y proporcional del regulador de intensidad (3.37) y (3.38).

$$k_{i_I} = \frac{1}{T_{i_I}} \left[\frac{\Omega}{s} \right] \quad (3.37)$$

$$k_{p_I} = k_{i_I} \cdot T_{n_i}[\Omega] \quad (3.38)$$

En la expresión (3.39) se establece un análisis de las unidades en el que se verifica la coherencia de los resultados obtenidos. La variable de entrada ($E(s)$) es la intensidad y la variable de salida ($U(s)$) es la tensión.

$$U[V] = k_p[\Omega]E[A] + k_{i_i} \left[\frac{\Omega}{s} \right] \int E dt[As] \quad (3.39)$$

La Figura 3.9 muestra los bloques de los reguladores PI de las componentes de la intensidad, i_d (a) e i_q (b), donde se observa como se realiza la eliminación de los términos de acoplamiento. En la Figura 3.9 (c) se muestra la implementación del regulador PI.

Cabe destacar que aunque el planteamiento y los resultados ofrecidos en la Tabla 3.2 son para magnitudes reales, las gráficas posteriores se expresan en magnitudes por unidad, para facilitar su interpretación.

PARÁMETROS DEL REGULADOR PI	
$L_f [mH]$	0.637
$R_f [\Omega]$	0.15
$\tau_{conv} [ms]$	0.617
$T_{lc_{int}} [s]$	0.0012
$T_{i_I} [\frac{s}{\Omega}]$	0.0082
$T_{n_I} [s]$	0.0042
$k_{i_I} [\frac{\Omega}{s}]$	121.5
$k_{p_I} [\Omega]$	0.516

Tabla 3.2. Parámetros del regulador PI de la intensidad

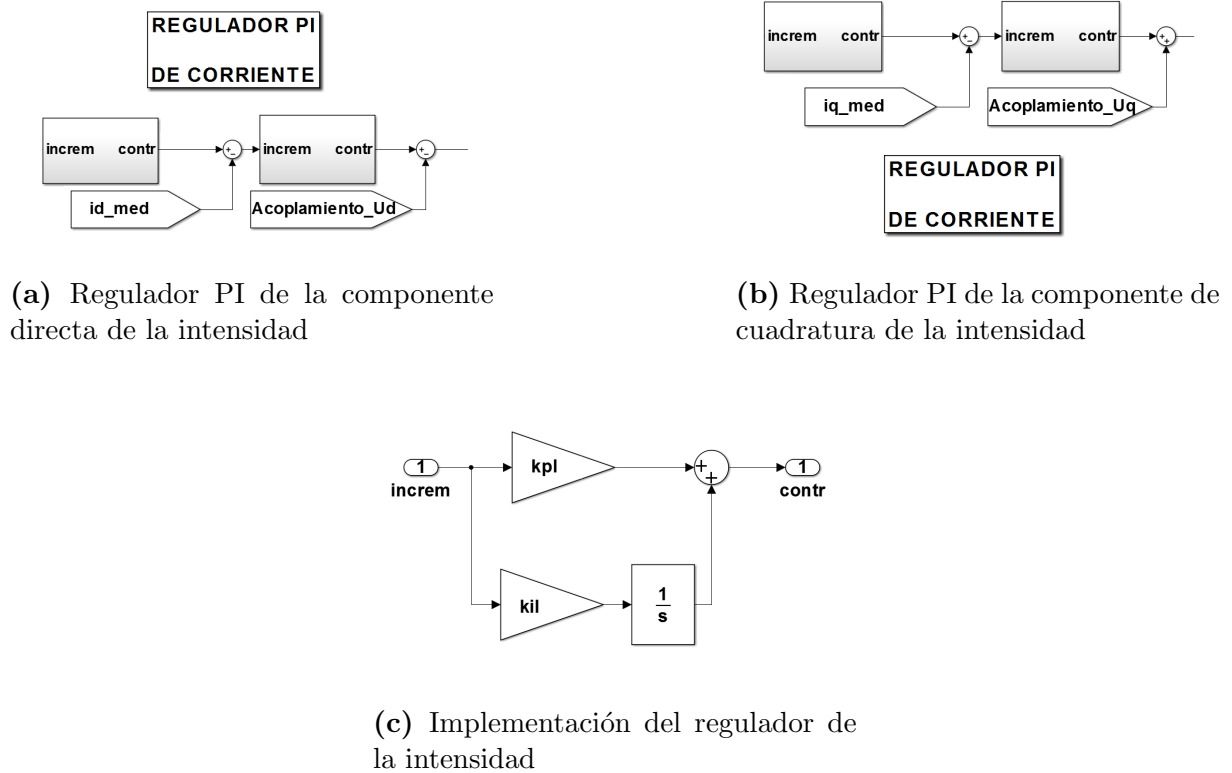


Figura 3.9. Regulador PI de la intensidad

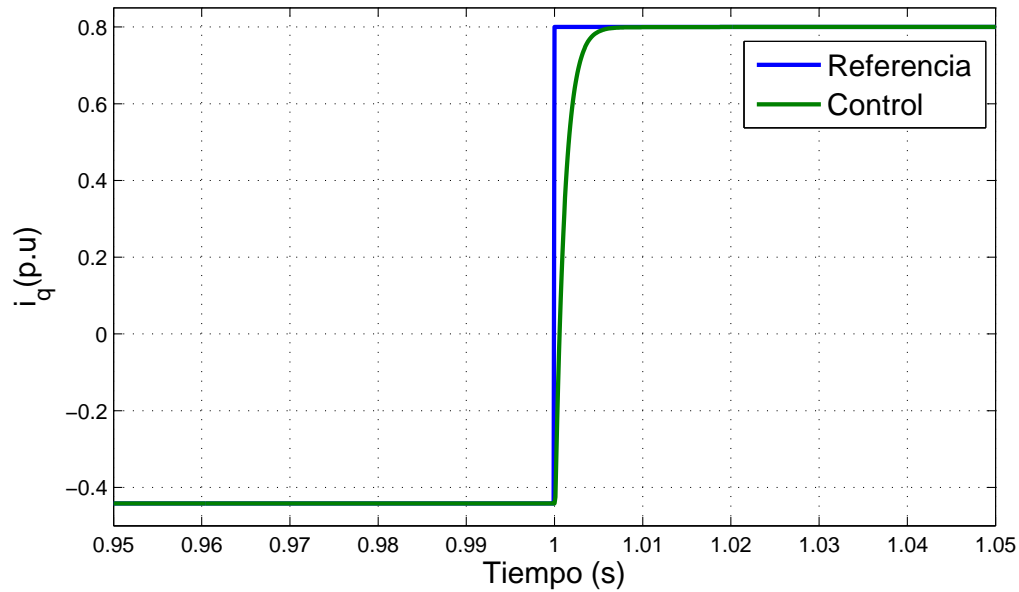


Figura 3.10. Respuesta del regulador PI de la intensidad, ante un cambio de consigna en i_q

En las Figuras 3.10 y 3.11, se produce una variación significativa de las consignas iniciales, para representar el efecto que se produce ante perturbaciones o fallas. La respuesta de los reguladores con los parámetros asignados es idónea, rápida y precisa, validando los planteamientos teóricos formulados.

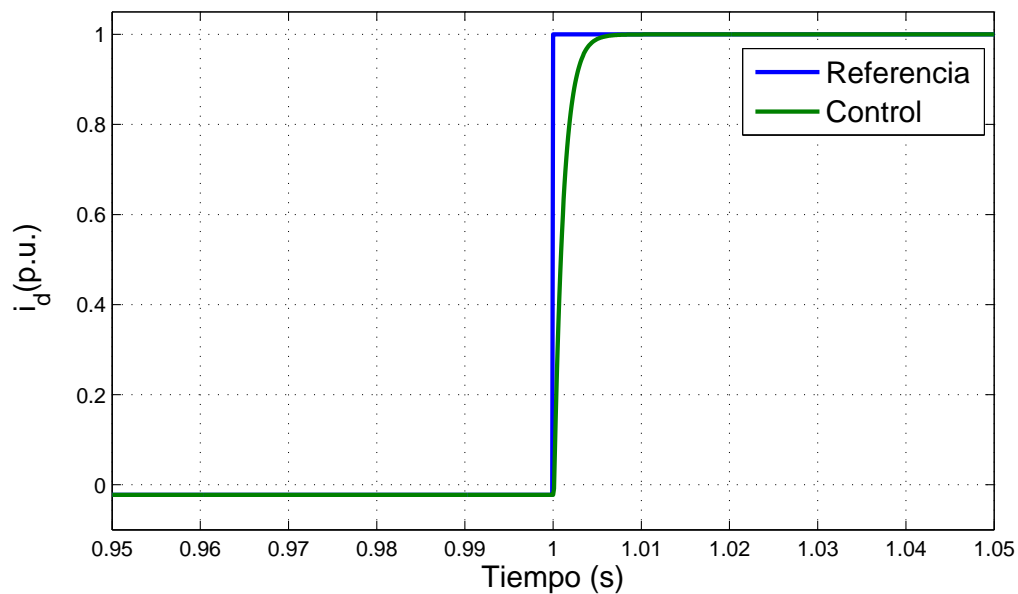


Figura 3.11. Respuesta del regulador PI de la intensidad, ante un cambio de consigna en i_d

3.6.2. Lazo de potencia reactiva

El lazo de potencia reactiva se emplea si el objetivo es corregir el factor de potencia, en un valor asignado externamente. El regulador PI debe controlar la componente del eje de cuadratura de la intensidad (i_q), ante las variaciones que sufre la planta.

La ecuación de planta del lazo de reactiva es la relación entre la corriente y la potencia reactiva a suministrar. A partir de la expresión (3.7), se obtiene (3.40).

$$\frac{Q(s)}{I_q(s)} = \frac{-3U_d(s)}{2} \quad (3.40)$$

La función del lazo abierto de reactiva (3.41) presenta una estructura semejante al de corriente.

$$G_{laQ} = G_{PIQ} \cdot G_{lc} \cdot G_{planta} = \frac{T_{nQ}s + 1}{T_{iQ}s} \cdot \frac{1}{1 + T_{lcint}s} \cdot \frac{1}{1 + \tau_{conv}s} \cdot \frac{-3U_d}{2} \quad (3.41)$$

Para simplificar los cálculos, se emplea la siguiente consideración:

$$K_q = \frac{-3U_d}{2}$$

La mayor constante de tiempo en este caso se trata del lazo interno de regulación de la intensidad, que se cancela con el cero del regulador T_{nQ} , como se expresa en (3.42) [39] [13]. El lazo abierto de reactiva definido en (3.41), queda simplificado a la expresión (3.43).

$$T_{nQ} = T_{lcint} = 2\tau_{conv}[s] \quad (3.42)$$

$$G_{laQ} = \frac{K_q}{T_{iQ}s \cdot (1 + \tau_{conv}s)} \quad (3.43)$$

A raíz de la representación del lazo cerrado de reactiva (3.44), y si se deprecia la componente $\frac{T_{iQ}}{K_q}\tau_{conv}s^2$ porque las frecuencias son muy bajas, se obtiene la ecuación (3.45) de la que se deduce el valor de la constante de tiempo del lazo cerrado de reactiva (3.46).

$$G_{lcQ} = \frac{G_{laQ}}{1 + G_{laQ}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{iQ}}{K_q}s + \frac{T_{iQ}}{K_q}\tau_{conv}s^2} \quad (3.44)$$

$$G_{lcQ} = \frac{1}{1 + \frac{T_{iQ}}{K_q}s} \quad (3.45)$$

$$T_{lcQ} = \frac{T_{iQ}}{K_q} \quad (3.46)$$

Mediante la relación de semejanza entre la expresión (3.33) y (3.44), se alcanza el sistema de ecuaciones (3.47) y (3.48), del que se halla el valor de la constante del termino integral del lazo de reactiva (3.49).

$$w_o = 2 \frac{\varepsilon \cdot K_q}{T_{i_Q}} \quad (3.47)$$

$$\frac{T_{i_Q}}{K_q} \tau_{conv} = \frac{1}{w_o^2} \quad (3.48)$$

Considerando que: $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Las ganancias correspondientes al término integral y proporcional del regulador (3.50) y (3.51), se obtienen a partir de las ecuaciones (3.42) y (3.49):

$$T_{i_Q} = 2 \cdot \tau_{conv} \cdot K_q = 3 \cdot U_d \cdot \tau_{conv} [Vs] \quad (3.49)$$

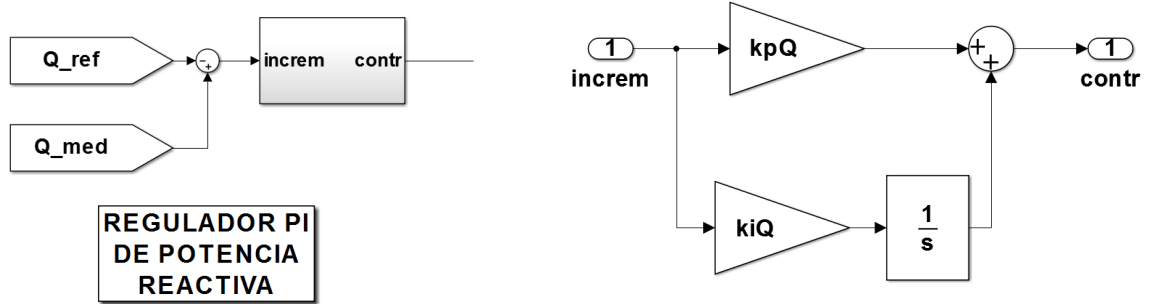
$$k_{i_Q} = \frac{1}{T_{i_Q}} \left[\frac{1}{Vs} \right] \quad (3.50)$$

$$k_{p_Q} = k_{i_Q} \cdot T_{n_Q} \left[\frac{1}{V} \right] \quad (3.51)$$

El análisis de las unidades mostrado en (3.52), sirve para comprobar la veracidad de los cálculos estimados en este punto. En esta ocasión la variable de entrada es la potencia reactiva inyectada o recibida y la variable de salida es la intensidad, de este modo quedaría:

$$U[A] = k_p \left[\frac{1}{V} \right] E[VA] + k_{i_i} \left[\frac{1}{Vs} \right] \int E dt [VA s] \quad (3.52)$$

La Figura 3.12 muestra el bloque del regulador de potencia reactiva en el control (a) y la implementación del regulador PI (b), cuyos parámetros se definen en la Tabla 3.3.



(a) Representación en el esquema general (b) Implementación del regulador de la potencia reactiva

Figura 3.12. Regulador PI de la potencia reactiva

PARÁMETROS DEL REGULADOR PI	
U_d [V]	93.9
$T_{lc_{int}}$ [s]	0.0012
τ_{conv} [ms]	0.617
T_{n_Q} [s]	0.0012
T_{i_Q} [Vs]	0.174
k_{i_Q} [$\frac{1}{Vs}$]	5.75
k_{p_Q} [$\frac{1}{V}$]	0.0071

Tabla 3.3. Parámetros del regulador PI de la potencia reactiva.

A fin de validar el análisis del lazo de potencia reactiva, se somete a dicho regulador a un cambio brusco en su consigna inicial, para evaluar su respuesta ante perturbaciones o fallas. Como se muestra en la Figura 3.13, el regulador opera de forma eficiente y eficaz. Dicho análisis se ofrece en magnitudes por unidad.

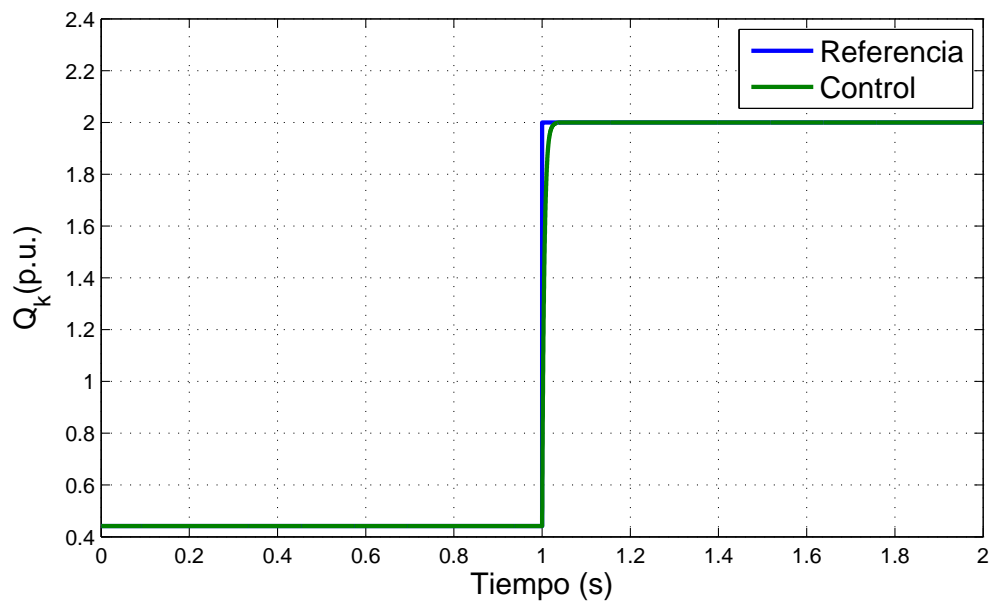


Figura 3.13. Respuesta del regulador PI de la potencia reactiva

3.6.3. Lazo de tensión eficaz del PCC

El lazo de tensión eficaz del PCC se emplea para mantener dicha tensión en los valores nominales. El análisis y planteamiento de este lazo es semejante al de reactiva, dado que ambas funciones son excluyentes y utilizan un regulador PI que responde ante las variaciones de potencia reactiva producidas por la carga, mediante respuestas controladas de la componente de cuadratura de la intensidad (i_q).

La ecuación que representa el lazo abierto del valor eficaz de la tensión (3.53), presenta una estructura muy parecida al de la potencia reactiva (3.41). La relación entre la variable de entrada (la tensión) y la de salida (la intensidad), atiende a la ley de Ohm y queda establecida por la propia impedancia del sistema (Z_{BASE}).

$$G_{la_{V_{rms}}} = G_{PI_{V_{rms}}} \cdot G_{lc} \cdot G_{planta} = \frac{T_{n_{V_{rms}}}s + 1}{T_{i_{V_{rms}}}s} \cdot \frac{1}{1 + T_{lc_{int}}s} \cdot \frac{1}{1 + \tau_{conv}s} \cdot Z_{BASE} \quad (3.53)$$

A raíz de la cancelación del término de mayor constante de tiempo se deduce la expresión (3.54), simplificando la expresión (3.53) a la ecuación (3.55).

$$T_{n_{V_{rms}}} = T_{lc_{int}} = 2\tau_{conv}[s] \quad (3.54)$$

$$G_{la_{V_{rms}}} = \frac{Z_{BASE}}{T_{i_{V_{rms}}}s} \cdot \frac{1}{1 + \tau_{conv}s} \quad (3.55)$$

Se desprecia el término $T_{i_{V_{rms}}}\tau_{conv}s^2$ y se obtiene el valor aproximado de la constante de tiempo del lazo cerrado del valor eficaz de tensión en (3.57).

$$G_{lc_{V_{rms}}} = \frac{G_{la_{V_{rms}}}}{1 + G_{la_{V_{rms}}}} = \frac{Z_{BASE}}{Z_{BASE} + T_{i_{V_{rms}}}s + T_{i_{V_{rms}}}\tau_{conv}s^2} \quad (3.56)$$

$$T_{lc_{V_{rms}}} = \frac{T_{i_{V_{rms}}}}{Z_{BASE}} \quad (3.57)$$

Atendiendo a la ecuación (3.56) y en esta ocasión, sin realizar la simplificación anterior, mediante la comparativa con la expresión (3.33) como en los casos anteriores, obtenemos la constante $T_{i_{V_{rms}}}$, mediante la fórmula (3.58).

$$T_{i_{V_{rms}}} = 2 \cdot \tau_{conv} \cdot Z_{BASE}[\Omega s] \quad (3.58)$$

Las ganancias de las componente integral y proporcional del controlador se calculan de las expresiones (3.59) y (3.60), empleando (3.54) y (3.58).

$$k_{i_{V_{rms}}} = \frac{1}{T_{i_{V_{rms}}}} \left[\frac{1}{\Omega s} \right] \quad (3.59)$$

$$k_{p_{V_{rms}}} = k_{i_{V_{rms}}} \cdot T_{n_{V_{rms}}} \left[\frac{1}{\Omega} \right] \quad (3.60)$$

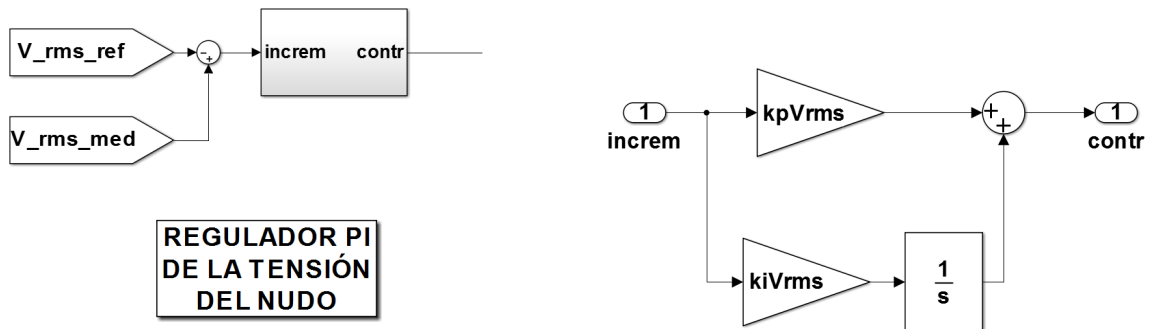
El análisis de las unidades expresado en (3.61), demuestra la coherencia de los términos obtenidos. Donde la variable de entrada es la tensión y la de salida es la intensidad.

$$U[A] = k_p \left[\frac{1}{\Omega} \right] E[V] + k_{i_i} \left[\frac{1}{\Omega s} \right] \int E dt [Vs] \quad (3.61)$$

PARÁMETROS DEL REGULADOR PI	
$T_{lc_{int}} [s]$	0.0012
$\tau_{conv} [ms]$	0.617
$T_{n_{V_{rms}}} [s]$	0.0012
$T_{i_{V_{rms}}} [\Omega s]$	0.0016
$k_{i_{V_{rms}}} \left[\frac{1}{\Omega s} \right]$	612.48
$k_{p_{V_{rms}}} \left[\frac{1}{\Omega} \right]$	0.756

Tabla 3.4. Parámetros del regulador PI de la tensión eficaz del punto de conexión a la red

La Figura 3.14 presenta el bloque del regulador PI del valor eficaz de tensión del PCC en el esquema general de control (a) y su implementación (b). Los parámetros del regulador se resumen en la Tabla 3.4.



(a) Bloque del regulador PI del valor eficaz de la tensión del PCC, en el esquema general

(b) Implementación del regulador del valor eficaz de la tensión del PCC

Figura 3.14. Regulador PI del valor eficaz de la tensión del punto de acople a la red

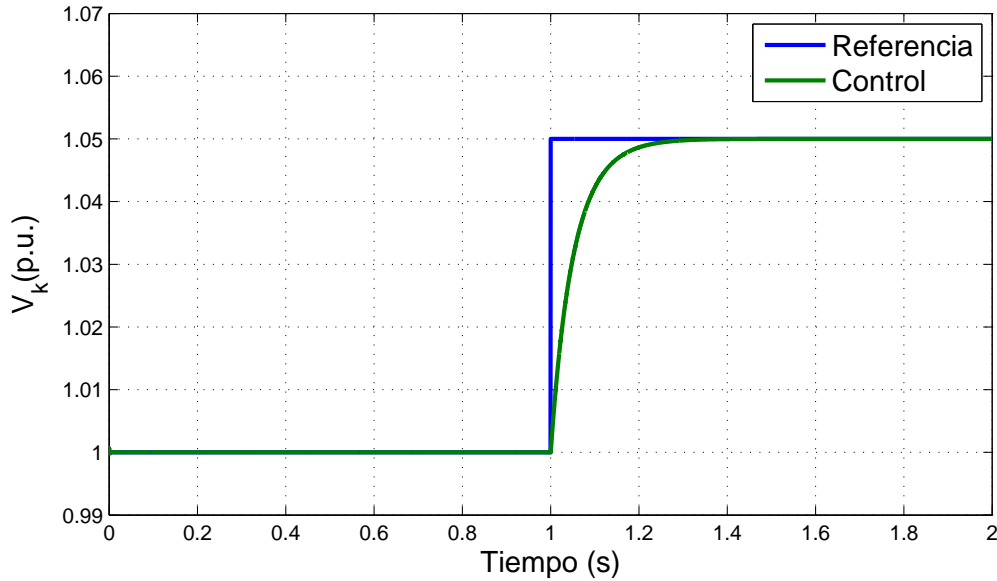


Figura 3.15. Respuesta del regulador PI del valor eficaz de la tensión del PCC

En la Figura 3.15 se analiza exclusivamente el lazo de valor eficaz de la tensión, provocando un cambio brusco en su consigna inicial. De nuevo la respuesta del controlador vuelve a ser idónea, aunque ligeramente más lenta. Cabe precisar que dicho análisis se ofrece en magnitudes por unidad.

3.6.4. Lazo de tensión en la etapa de continua

El objetivo del lazo de control de la tensión en la etapa de continua, es mantenerla nivelada y constante frente a perturbaciones externas. En primera instancia, se establece cual será la ecuación de planta producto de la relación entre la entrada que es la tensión de continua (V_{DC}) y la salida que es la componente directa de la intensidad (i_d), mediante la ecuación (3.63). La expresión del control del lazo abierto de continua se expresa en (3.62).

$$G_{lav_{DC}} = G_{PI_{V_{DC}}} \cdot G_{lc} \cdot G_{planta} = \frac{T_{nv_{DC}}s + 1}{T_{iv_{DC}}s} \cdot \frac{1}{1 + T_{lc_{int}}s} \cdot \frac{1}{1 + \tau_{conv}s} \cdot G_{planta} \quad (3.62)$$

$$I_c = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (3.63)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (3.63), puesto que es un estudio en el modelo del tiempo continuo, se obtiene (3.64).

$$I_c(s) = CsV_{DC}(s) \quad (3.64)$$

Empleando la expresión (3.64), la ecuación de la planta se define en (3.65).

$$G_{planta} = \frac{V_{DC}(s)}{I_c(s)} = \frac{1}{Cs} \quad (3.65)$$

El método de regulación aplicado en este lazo será el del óptimo simétrico como consecuencia de la presencia de dos polos en el origen [41]. El empleo de dicha técnica permite alcanzar respuestas eficientes frente a perturbaciones y no frente a variaciones en la variable controlada, como si era el objetivo primordial en el método de la cancelación de la mayor constante de tiempo. Otra característica que favorece su elección es que para el caso del condensador de un convertidor conectado a la red, la constante de planta es elevada [39]. De la lógica propia de dicho método y atendiendo al diagrama de Bode de su función de transferencia, se alcanza la expresión aproximada (3.66).

$$G_{lav_{DC}} = \frac{T_{nv_{DC}}s + 1}{T_{iv_{DC}}s} \cdot \frac{1}{Cs} \quad (3.66)$$

La magnitud de la función de respuesta es aproximadamente nula a bajas frecuencias [41]. Teniendo en cuenta que el sistema eléctrico de estudio es de una frecuencia fundamental de 60 Hz en la frecuencia de cruce (w_c), la función de transferencia atiende a la igualdad definida en la expresión (3.67). Mientras que la frecuencia de corte queda definida en la ecuación (3.68).

$$\left| G_{lav_{DC}}(s = jw_c) \right| = 1 = \frac{\left| T_{nv_{DC}}jw_c + 1 \right|}{\left| T_{iv_{DC}}jw_c \right|} \cdot \frac{1}{|Cjw_c|} \cong \frac{T_{nv_{DC}}}{T_{iv_{DC}}Cw_c} \quad (3.67)$$

$$w_c = \frac{T_{nv_{DC}}}{T_{iv_{DC}}C} \quad (3.68)$$

La respuesta en frecuencia es simétrica, con el mayor margen de fase posible en la frecuencia de cruce [39]. Por dicha condición se cumple la expresión (3.69).

$$\frac{2}{T_{nv_{DC}}} = w_c = \frac{1}{2T_{lc_{int}}} \quad (3.69)$$

Del planteamiento de las expresiones (3.69) y (3.70), se deducen las constantes de tiempo (3.71) y (3.72).

$$\frac{2}{T_{nv_{DC}}} = w_c = \frac{T_{nv_{DC}}}{T_{iv_{DC}}C} \quad (3.70)$$

$$T_{nv_{DC}} = 4T_{lc_{int}} = 8\tau_{conv}[s] \quad (3.71)$$

$$T_{i_{V_{DC}}} = \frac{T_{n_{V_{DC}}}^2}{2C} = \frac{32\tau_{conv}^2}{C} [s \cdot \Omega] \quad (3.72)$$

A partir de las constantes de tiempo, se logran las componentes directa e integral del regulador PI de continua (3.73) y (3.74), debido a la relación directa existente entre ambas variables.

$$k_{i_{V_{DC}}} = \frac{1}{T_{i_{V_{DC}}}} \left[\frac{1}{s \cdot \Omega} \right] \quad (3.73)$$

$$k_{p_{V_{DC}}} = k_{i_{V_{DC}}} \cdot T_{n_{V_{DC}}} \left[\frac{1}{\Omega} \right] \quad (3.74)$$

Para concluir se formula el análisis de las unidades en (3.75), donde vuelve a comprobarse que los valores obtenidos son razonables. En esta ocasión la variable de entrada es V_{DC} y la de salida se trata de i_d .

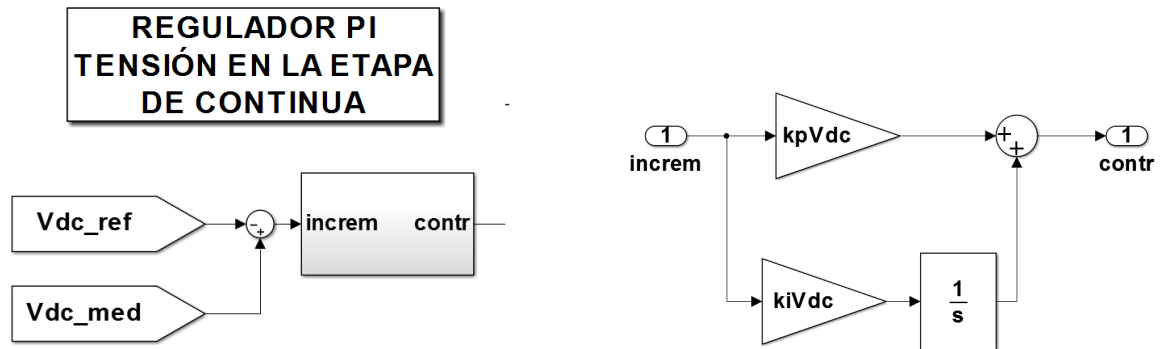
$$U[A] = k_p \left[\frac{1}{\Omega} \right] E[V] + k_i \left[\frac{1}{\Omega s} \right] \int E dt [Vs] \quad (3.75)$$

PARÁMETROS DEL REGULADOR PI	
$T_{lc_{int}} [s]$	0.0012
$\tau_{conv} [ms]$	0.617
$T_{n_{V_{DC}}} [s]$	0.0049
$T_{i_{V_{DC}}} [\Omega s]$	0.0025
$k_{i_{V_{DC}}} \left[\frac{1}{\Omega s} \right]$	395.3
$k_{p_{V_{DC}}} \left[\frac{1}{\Omega} \right]$	1.952

Tabla 3.5. Parámetros del regulador PI de la tensión de la etapa de continua

En la Figura 3.16 (a) se representa el bloque del regulador de tensión en la etapa de continua en el esquema general de control. En dicha Figura 3.16 (b) se representa también la implementación del propio regulador PI, cuyos parámetros se resumen en la Tabla 3.5.

Analizando exclusivamente el lazo de tensión de continua, se somete a dicho regulador a un caso donde se produce una falla y a raíz de los resultados ofrecidos en la Figura 3.17 se observa que la respuesta del regulador es adecuada y satisfactoria.



(a) Bloque del regulador PI de la tensión en la etapa de continua, en el esquema general

(b) Implementación del regulador de la tensión en la etapa de continua

Figura 3.16. Implementación del regulador de la tensión de la etapa de continua

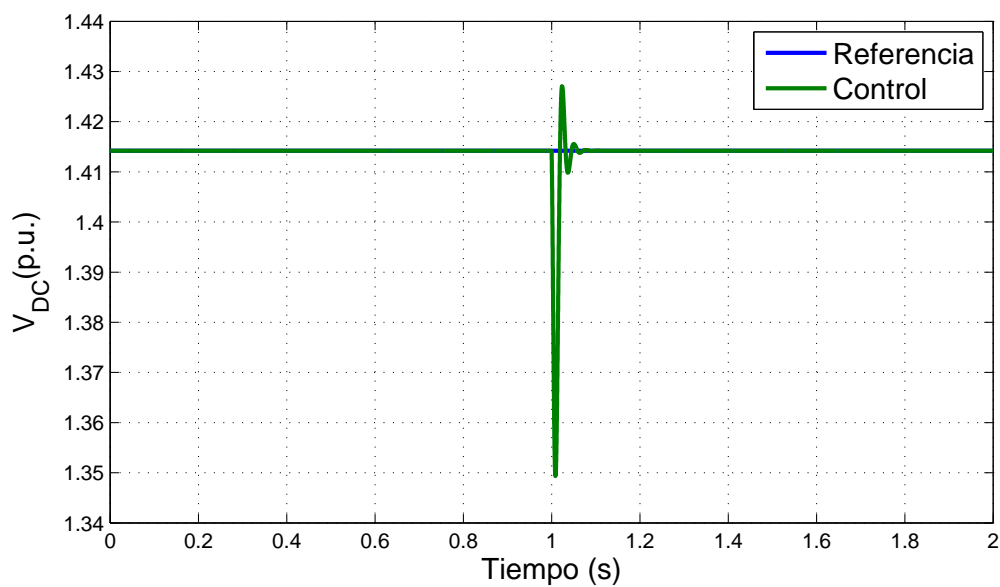


Figura 3.17. Respuesta del regulador PI de la tensión de la etapa de continua

Cabe destacar que si se atiende a la ecuación (3.15), al producirse una variación en la tensión del condensador como resultado de una perturbación en la consigna del eje directo, se genera un valor residual de energía. Este efecto queda manifestado en la presencia de potencia activa o real en el convertidor, como se observa en la Figura 3.18. Esta respuesta presentada en magnitudes por unidad es producto de la variación de la tensión del condensador del ejemplo anterior mostrado en la Figura 3.17.

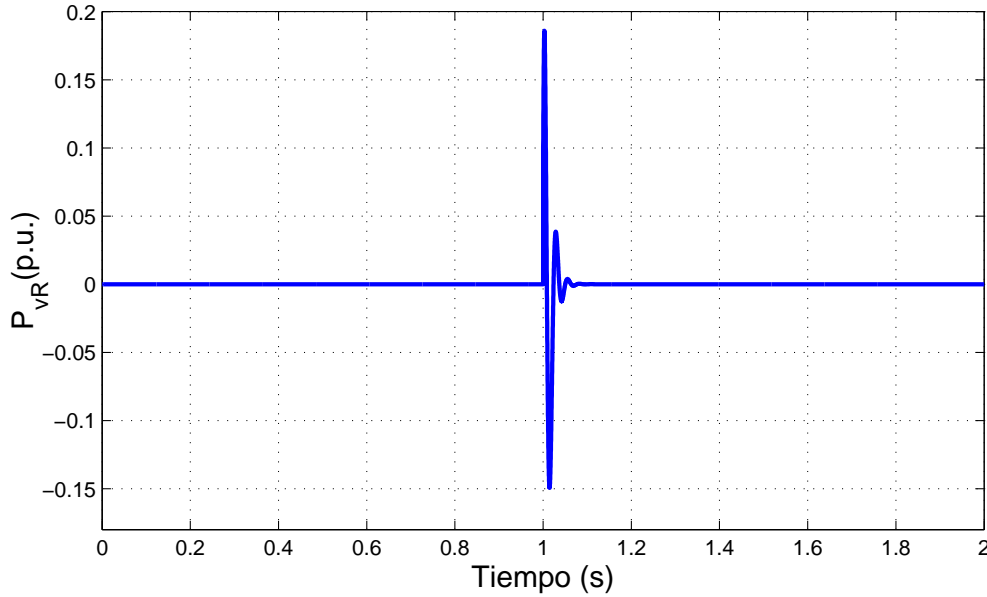


Figura 3.18. Potencia activa del convertidor, generada por la respuesta del regulador PI de la tensión de la etapa de continua

3.7. Anti-windup para reguladores PI

El regulador PI es un mecanismo de control ampliamente utilizado en la industria, sin embargo uno de sus principales defectos se produce por el denominado efecto windup. Este fenómeno que se produce cuando se alcanza los límites físicos del sistema, provoca significativas pérdidas y la degradación de la actuación del regulador que puede desembocar en un control inestable [42].

Atendiendo a la Figura 3.19 y a los conceptos analizados en el punto 3.4, ante un fenómeno que provoca que la señal de salida del controlador u supere los límites físicos, dicha señal se satura obteniendo u_s , que se mantendrá constante en el término máximo o mínimo definido [43]. Este concepto se resume en:

$$u_s = \begin{cases} u_{max}; & u > u_{max} \\ u; & u_{min} < u < u_{max} \\ u_{min}; & u < u_{min} \end{cases} \quad (3.76)$$

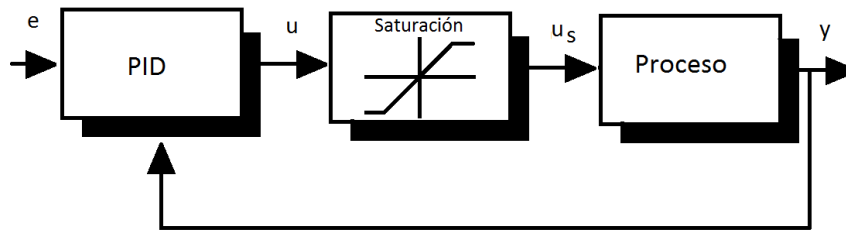


Figura 3.19. Esquema general del fenómeno de la saturación

En un controlador saturado la señal del error constante, producto de la referencia y la retroalimentación de la señal del proceso (y), genera el fenómeno del windup, como se presenta en la Figura 3.19. Para solucionar este fenómeno se implementa la estructura del anti-windup.

A fin de analizar el efecto windup y la eficacia de la estructura del anti-windup, se estudia las respuestas del regulador PI mostrado en la Figura 3.20, el cual es un bloque del control del STATCOM, donde se ha establecido un código numérico que se emplea en la Figura 3.21, para facilitar la comprensión de la información presentada.

El caso de estudio consiste en la conexión de una carga elevada a la red, la cual es desconectada posteriormente tras un intervalo de un segundo. Esta situación exige la compensación del STATCOM mediante la inyección de potencia reactiva, sin embargo al alcanzar su límite físico los controladores se saturan. En la Figura 3.21 y la Figura 3.22 se compara la respuesta de dos modelos idénticos, salvo que en uno de ellos no se ha implementado ningún anti-windup. La alternativa que adolece de dicha estructura se representa con tonalidades de color más oscuras.

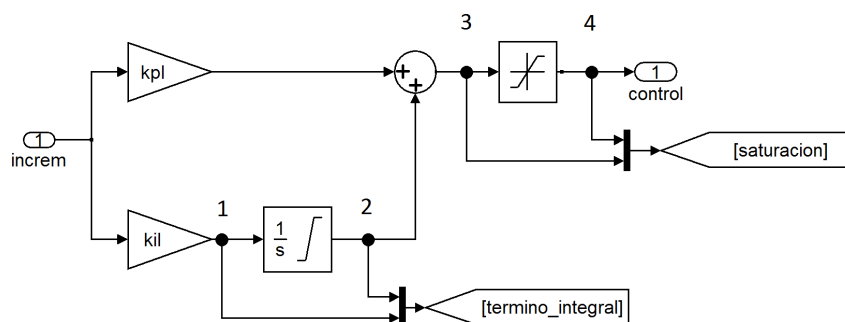
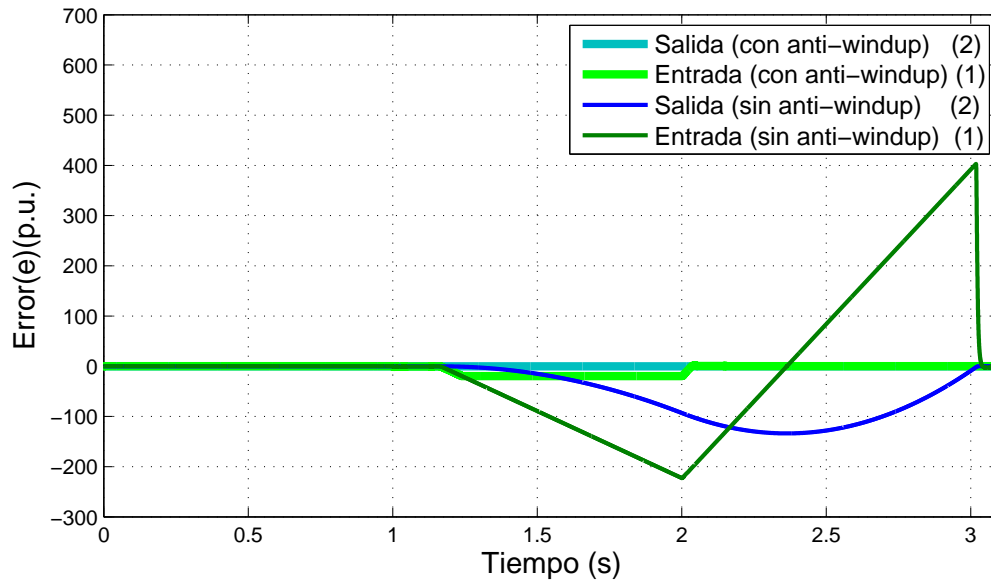
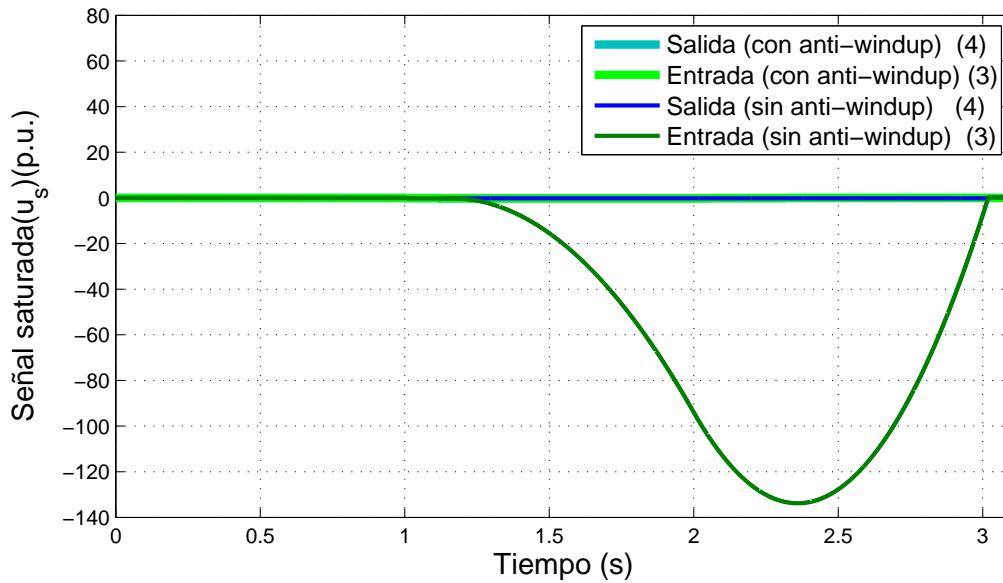


Figura 3.20. Esquema general del regulador PI, donde se estudia el efecto del windup

En la Figura 3.21 (a) se observa que el anti-windup evita que el error siga aumentando, debido a que produce que la salida del término integral sea nula al alcanza un valor cercano al límite físico. De este modo, una vez desconectada la carga el regulador retorna rápidamente al punto de operación idóneo. Sin embargo, en la opción en la que no se ha saturado el término integral, se genera un efecto indeseado enorme en el regulador que no debería existir.



(a) Comparación de la saturación del término integral en ambos casos



(b) Comparación de la saturación en ambos casos

Figura 3.21. Ejemplo ilustrativo del fenómeno del windup

Como se observa en la Figura 3.21 (b), en este último caso el controlador permanece saturado hasta un segundo después de la desconexión de la carga, a pesar de que el sistema se sitúa en un punto de operación donde no se alcanza los límites físicos. El windup acumulado provoca una respuesta del controlador con un retraso significativo en su tiempo de estabilización y con perturbaciones considerables, que incluso provocan la pérdida del control [44], como ocurre en las potencias del caso analizado, como se muestra en la Figura 3.22.

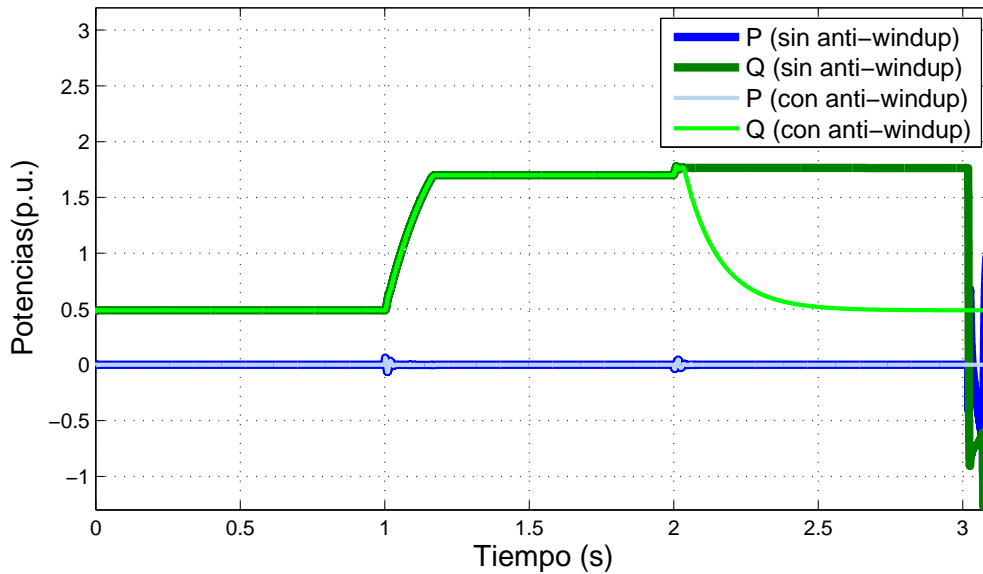


Figura 3.22. Efecto del windup en las potencias suministradas por el convertidor

En definitiva, el empleo del anti-windup evita una actuación defectuosa y posibilita un control óptimo. Bajo este contexto, existen una multitud de técnicas alternativas para implementar el anti-windup [43]. La opción elegida es la integración condicional, en el que se bloquea la acción integral del regulador al cumplirse una serie de condiciones en la señal de control o en el error, las premisas más habituales son:

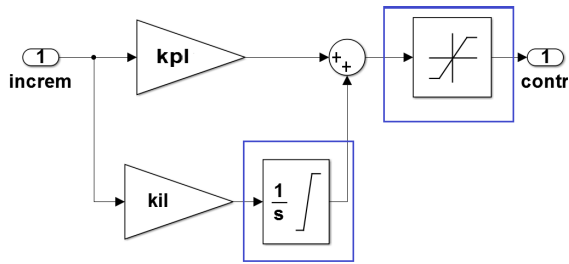
1. El término integral se limita a un determinado valor.
2. La integración para cuando el error del sistema es enorme.
3. La integración para cuando los reguladores se saturan.
4. La integración para cuando el controlador se satura y el error del sistema y la variable manipulada tienen idéntico signo.

En este estudio se ha optado por frenar la integración cuando los reguladores se saturan, la implementación del anti-windup ha sido idéntica en todos los reguladores, como se observa en la Figura 3.23. La ecuación del regulador PI se define en (3.77) [42].

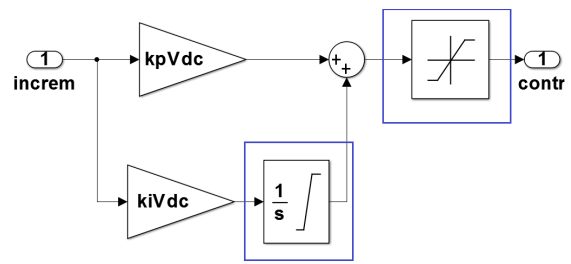
$$u_n = K_P e + K_I \eta \quad (3.77)$$

Considerando que:

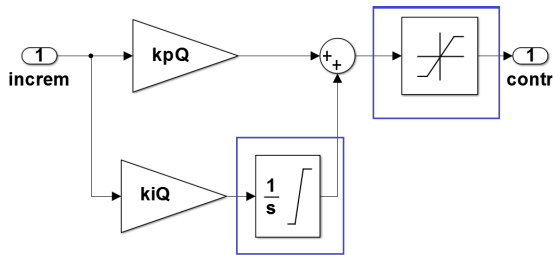
$$\dot{\eta} \equiv \frac{d\eta}{dt} = e$$



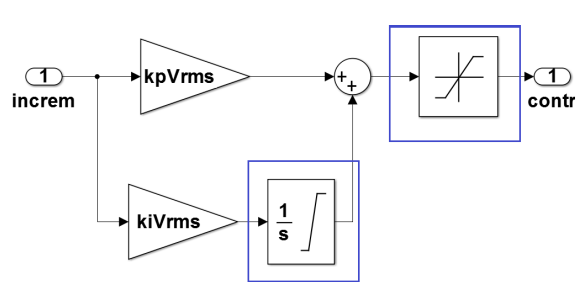
(a) Regulador PI de la intensidad, empleando el anti-windup



(b) Regulador PI de la tensión en la etapa de continua, empleando el anti-windup



(c) Regulador PI de la potencia reactiva, empleando el anti-windup



(d) Regulador PI de la tensión eficaz del PCC, empleando el anti-windup

Figura 3.23. Esquema del tipo de anti-windup empleado en los reguladores PI

3.8. Implementación del SPWM

El último punto de estudio de este tema, es la implementación del convertidor real que opera mediante modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM). El esquema general del control, del convertidor y del filtro quedan definidos en la Figura 3.24. Las componentes del circuito de dicha representación quedan resumidos en el Apéndice A. Atendiendo a la nomenclatura general, la intensidad de la fuente es i_s , la de la carga es i_L e i_k se corresponde a la corriente que circula entre el STATCOM y el PCC.

Como se analizó en el punto 2.3.3, para la técnica de modulación SPWM se compara la señal portadora triangular con la modular, obteniendo el tren de pulsos del modulador, como se muestra en la Figura 3.25.

Como se observa en las Figura 3.26 (a) al convertidor real llega la señal de pulsos, que determina el encendido y apagado de los interruptores, generando de este modo la señal sinusoidal de la tensión de salida. Mientras que en dicha Figura 3.26 (b), se analiza como a partir de la señal de la tensión de salida del control y la tensión de la etapa de continua se obtiene un índice de modulación inferior a la unidad, siempre que no se supere la capacidad del propio condensador.

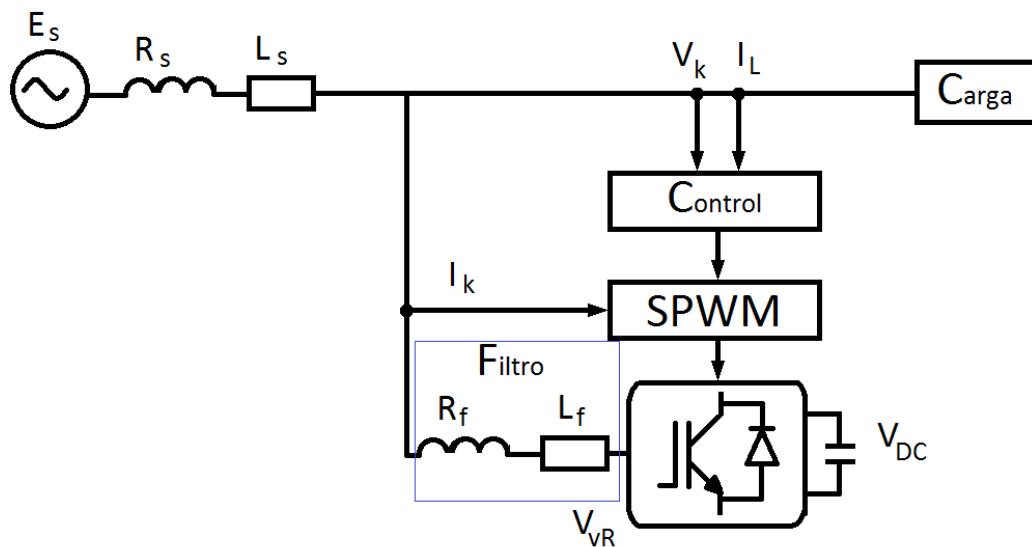


Figura 3.24. Representación esquemática del sistema general con el convertidor real [45]

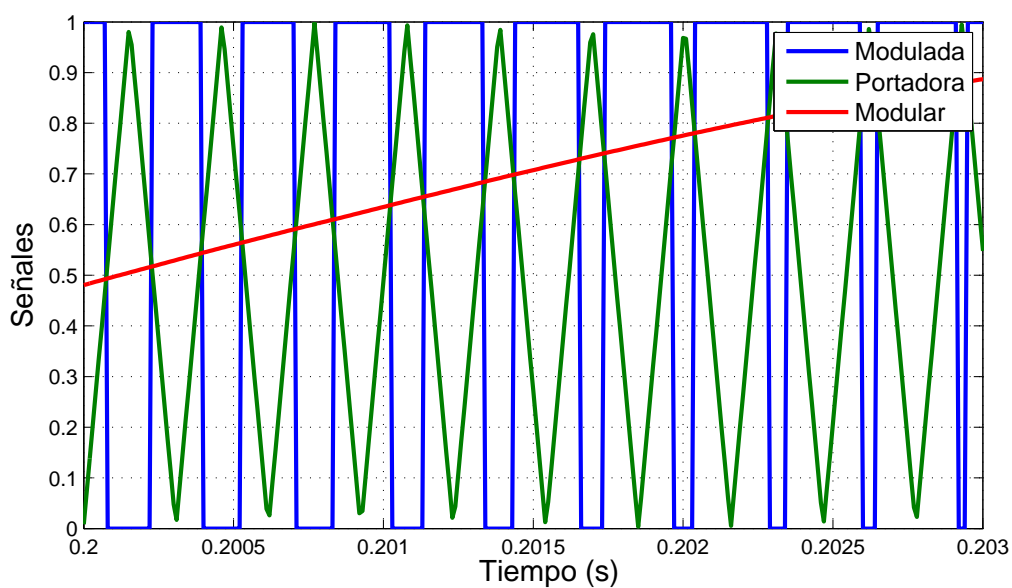
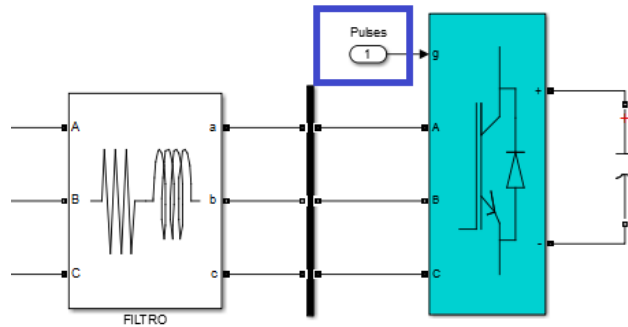
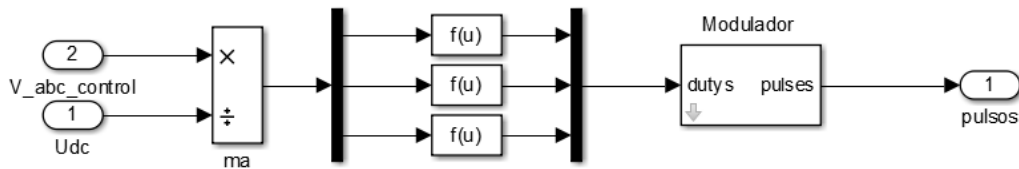


Figura 3.25. Representación de la técnica de modulación SPWM



(a) Convertidor real dirigido por la señal de pulsos



(b) Implementación para obtener la señal de pulsos

Figura 3.26. Implementación general del bloque SPWM

El VSC simula a partir del tren de pulsos la señal sinusoidal, la cual presenta un elevado contenido de armónicos a frecuencias elevadas producto de la propia conmutación. En la Figura 3.24 se remarca el filtro pasivo a la salida del propio STATCOM, el cual elimina o atenúa los armónicos de orden superior de la modulación, como se observa en la Figura 3.27. En dicha imagen se establece la comparación entre la señal de tensión de la red (V_k), tras la actuación del filtro paso bajo y la señal de tensión generada por el convertidor (V_{vR}), para demostrar la influencia de dicho elemento.

A pesar de que en el punto 2.3.3 se incidió en que un valor elevado de la frecuencia de conmutación favorece la eficiencia del filtrado, dicho término queda restringido por las pérdidas de encendido de los interruptores, lo que limita a operar a frecuencias menores [13] [16].

Los filtros pasivos se clasifican en tres clases principales, los L, los LC y los LCL, donde todas las componentes reactivas están conectadas a una pequeña resistencia para aumentar la estabilidad en comparación con los filtros puramente reactivos [13]. En este estudio se ha optado por el modelo más sencillo, que presenta la ventaja de un bajo coste inicial. En general, los parámetros principales que se atienden de un filtro son la frecuencia de resonancia, la distorsión armónica eliminada y la capacidad de compensación reactiva que permite, este último aspecto se analizó en el punto 2.3.4 [46].

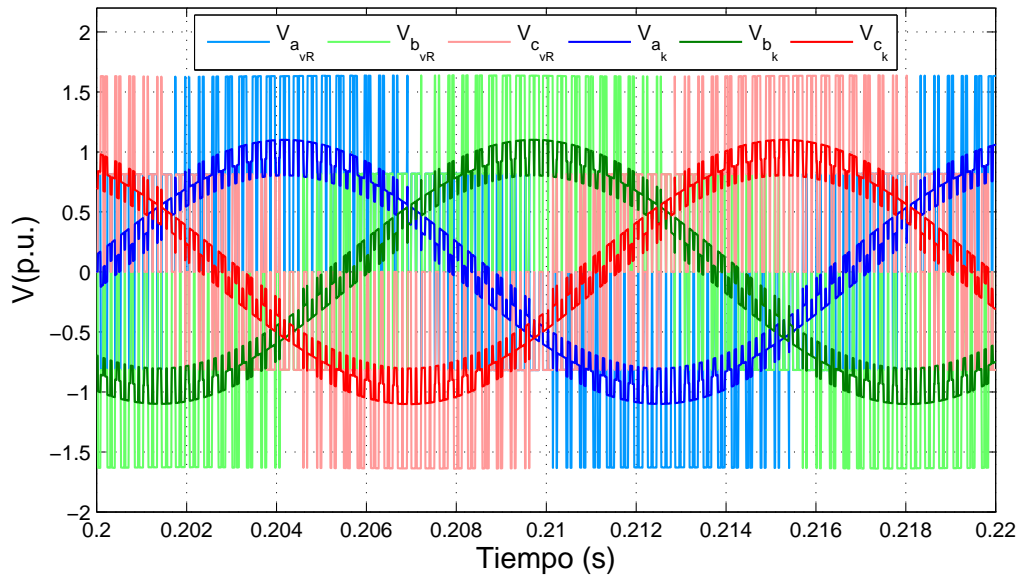


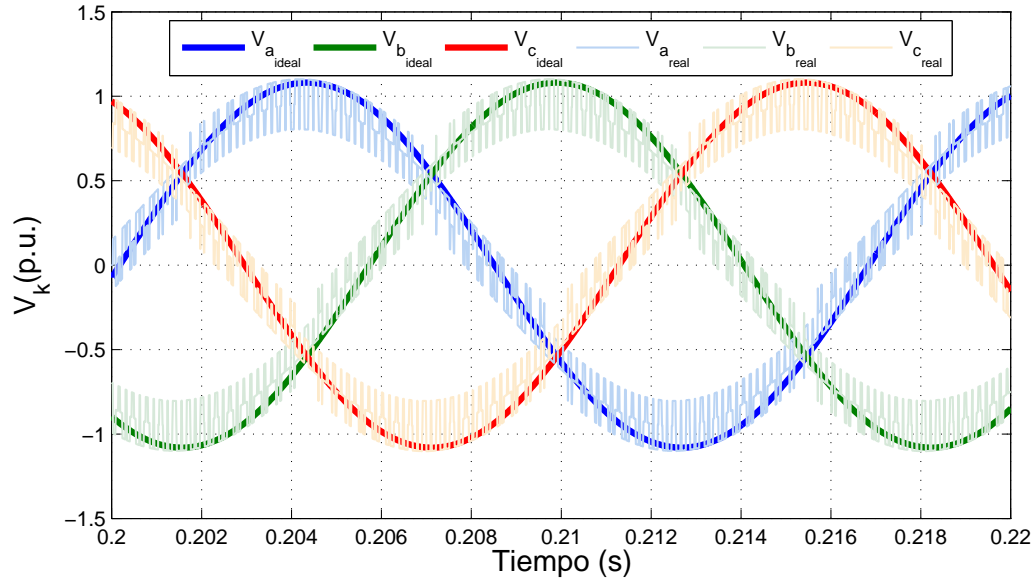
Figura 3.27. Efecto del filtro pasivo en la eliminación de los armónicos

A la hora de seleccionar una inductancia de filtrado idónea, se debe atender aproximaciones tales como:

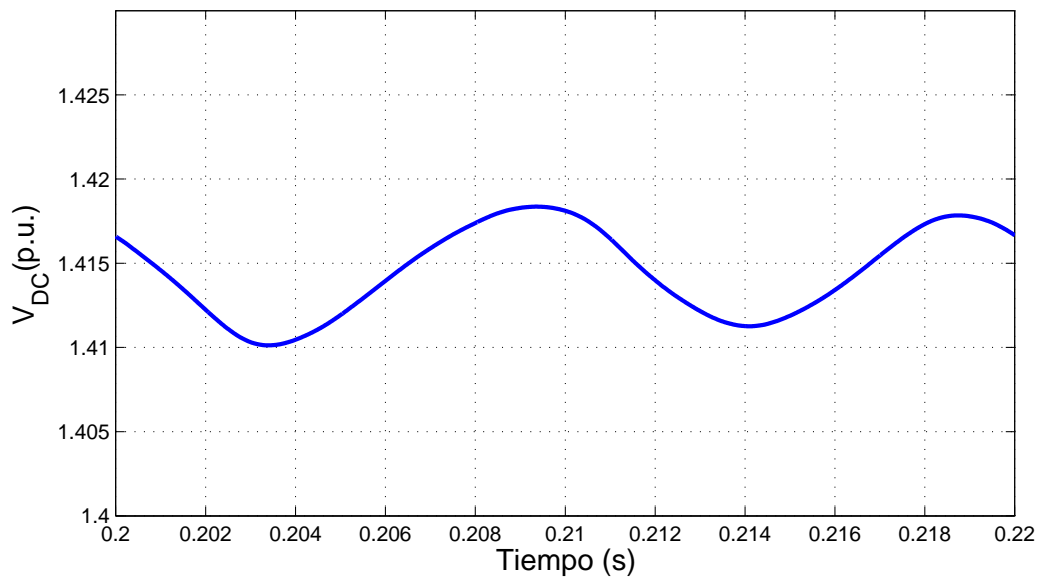
- Lograr que la caída de tensión en la inductancia no supere el 20 % respecto a la del sistema [46], incluso un valor más restrictivo situado en torno al 10 % [45].
- La intensidad fundamental del condensador no supere el 5 % de la intensidad del STATCOM, favoreciendo de este modo la eficiencia del filtrado [46].

Generalmente para cumplir estas condiciones la reactancia del filtro pasivo inductivo supone un 20 % del valor de la impedancia del STATCOM [13], en este proyecto se atiende a este criterio como se observa en el Apéndice A. Emplear únicamente una inductancia obliga a que esta deba ser de dimensiones enormes para conseguir reducir la distorsión armónica total (THD), suponiendo un aumento relevante del coste y lastrando la capacidad del STATCOM.

Al comparar la señal de tensión modulada tras el filtro con la ideal, esta presenta distorsiones como se muestra en la Figura 3.28 (a). Este efecto indeseado se produce por los armónicos con frecuencias cercanas a la fundamental, que producen errores en las mediciones utilizadas para la retroalimentación del control, provocando efectos negativos tales como fluctuaciones en la tensión del condensador que impiden que se mantenga constante, como se demuestra en la Figura 3.28 (b) [13].



(a) Comparación de la onda sinusoidal simulada con la ideal



(b) Tensión de la etapa de continua

Figura 3.28. Influencia de la modulación en la tensión de la etapa de continua (V_{DC})

Capítulo 4

Resultados de la Simulación

Es este capítulo se ofrece un análisis de la respuesta del STATCOM frente a las distintas perturbaciones planteadas, a raíz de la implementación analizada en el Capítulo 3. En las secciones 4.1 y 4.2, se muestran los resultados obtenidos en el dominio del tiempo continuo manteniendo la consideración de que la actuación del convertidor se asemeja al de una fuente de tensión alterna promediada, dirigida por el control. En los últimos casos se expone un análisis complementario en el dominio del tiempo discreto donde el STATCOM opera como un convertidor de dos niveles con modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM), con una frecuencia de conmutación de 1620 Hz.

El punto 4.1 muestra un análisis de la actuación del STATCOM como regulador de la tensión eficaz del PCC, mientras que la sección 4.2 se centra en su función como corrector del factor de potencia.

En términos generales las cargas industriales presentan generalmente un carácter inductivo. El STATCOM responde a los cambios de dichas cargas producidos por maniobras o conmutaciones. Dichas variaciones producen huecos de tensión, lo que se traduce en gastos y costes en el mantenimiento. Por esta razón, existe un amplio abanico de investigaciones sobre los motivos o causas que generan los huecos de tensión, sus consecuencias y efectos [47] [48] [49].

La implementación del modelo de control del STATCOM analizada en el Capítulo 3 se someterá a caídas breves de tensión en un tiempo inferior a 5 segundos del orden del 95 % de la tensión nominal, como representación del efecto producido por la conexión de cargas industriales lineales de carácter inductivo. En su defecto, se planteará también el caso de desconexiones, ejemplificando la situación que se produce en horarios nocturnos cuando la industria permanece inactiva provocando un aumento de la tensión indeseado, que en las simulaciones se situará en torno al 105 % de la nominal.

Las características del circuito de estudio de la Figura 4.1, se definen en la sección 2.2.3 y los valores de los elementos empleados se presentan en el Apéndice A. La “carga” puede ser medida por su intensidad, pero en términos del sistema eléctrico se trata de la potencia reactiva (Q) de la carga, la cual es directamente responsable de la caída de tensión o del factor de potencia. La carga inicial del sistema será inductiva, dado que es la situación habitual y su definición se simplifica en su potencia aparente equivalente, compuesta de:

- $P_{CARGA} = 3 [kW]$
- $Q_{CARGA} = 3 [kVAr]$

La carga auxiliar, que se muestra en la Figura 4.1, sirve como ejemplificación de las variaciones producidas en el sistema y se define por sus potencias activa y reactiva. Se ha establecido distintos casos de estudio en los que se remarca detalles relevantes de la actuación del STATCOM.

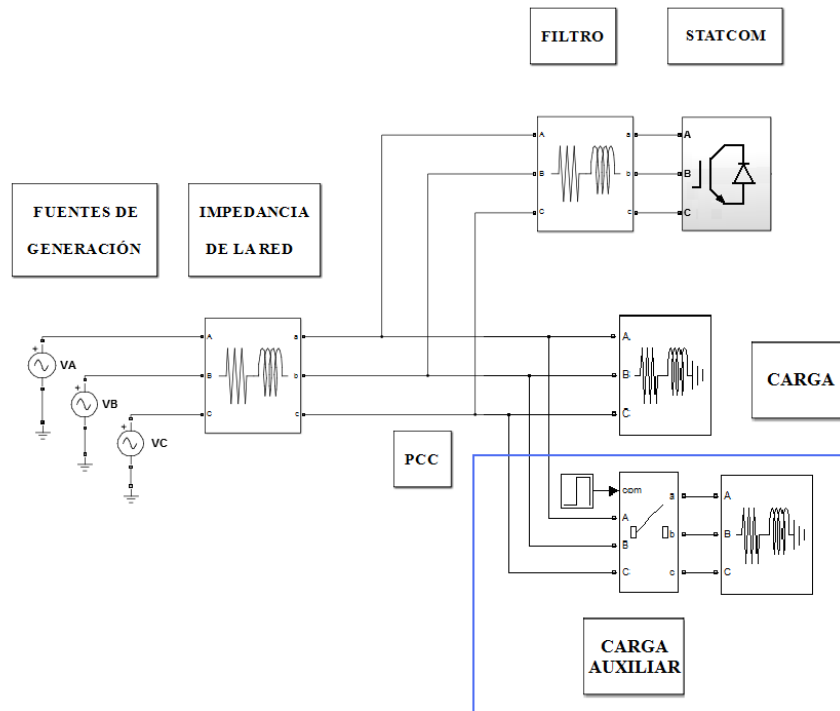


Figura 4.1. Caso de estudio

Las simulaciones se producirán en una pequeña escala de tiempo de entre 2 y 5 segundos. La duración estipulada es consecuencia en primer lugar de la propia naturaleza de las magnitudes eléctricas, que a diferencias de otros campos como por ejemplo en la termodinámica, pueden sufrir grandes variaciones en las variables fundamentales en un pequeño periodo de tiempo. La eficiencia dinámica y velocidad de respuesta del STATCOM queda ratificada por la brevedad de los periodos estudiados.

En todos los casos realizados, se presenta un resumen del valor de la carga inicial, la carga auxiliar y por último, el resultado de la interacción de ambas, mediante la nomenclatura:

- CI : Carga inicial.
- CA : Carga auxiliar.
- CT : Carga total equivalente.

4.1. STATCOM como regulador de tensión

El modelo o esquema de control empleado se corresponde al del STATCOM como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red. Las simulaciones se utilizarán para ejemplificar que cumple dicha finalidad, valorando la potencia reactiva que debe suministrar o absorber, y el papel que ejerce los límites establecidos para evitar la sobremodulación y no superar la intensidad máxima permitida por los IGBTs, explicados en las secciones 2.3.4 y 3.4.

4.1.1. Primer caso

Caso 1	Tiempo(s)								
	0-1			1-2			2-3		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	0	0.3
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.5	0.8	0.3	0	0.3

Tabla 4.1. Caso 1, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red

El primer caso de estudio consiste en la conexión de una carga inductiva elevada de una potencia reactiva de 5 kVAr, la cual será desconectada posteriormente para demostrar la eficiencia del control implementado. Las características de la carga equivalente quedan resumidas en la Tabla 4.1.

En la Figura 4.2, se observa que inicialmente la carga hubiera provocado un descenso del 2 % de la tensión nominal, sin la actuación del STATCOM. No obstante, empleando un STATCOM sin ningún tipo de restricción se logra mantener la tensión en el valor nominal. Transcurrido un segundo, la incorporación de la carga auxiliar supone un aumento significativo de la potencia reactiva inductiva, que produce una caída de la tensión adicional del 2 % de la nominal, acumulando un descenso total del 4 % del nominal, que el STATCOM ideal es capaz de solventar. Para alcanzar dicho resultado el dispositivo inyecta potencia reactiva, como se muestra en la Figura 4.4. En dicha representación, se observa la rápida respuesta del convertidor cuando se retorna al estado inicial, tras la desconexión de la carga auxiliar.

Otro detalle relevante es que el STATCOM suministra potencia reactiva al PCC por el carácter inductivo de la carga conectada inicialmente, lo cual se demuestra en el hecho de que la intensidad está atrasada respecto a la tensión del PCC como se analizó en el punto 2.2.1, dicho desfase se muestra en la Figura 4.3.

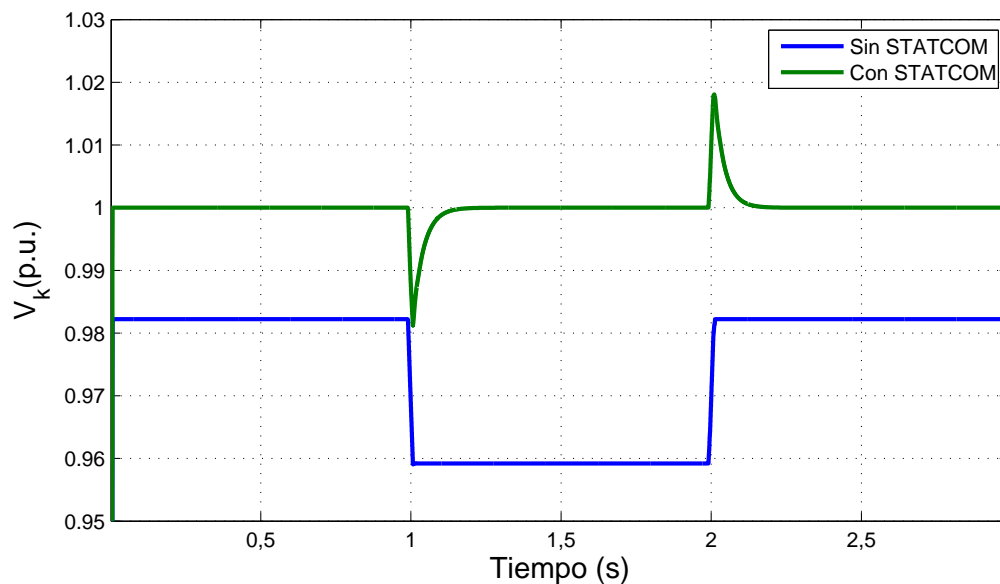


Figura 4.2. Demostración de la actuación eficiente del STATCOM

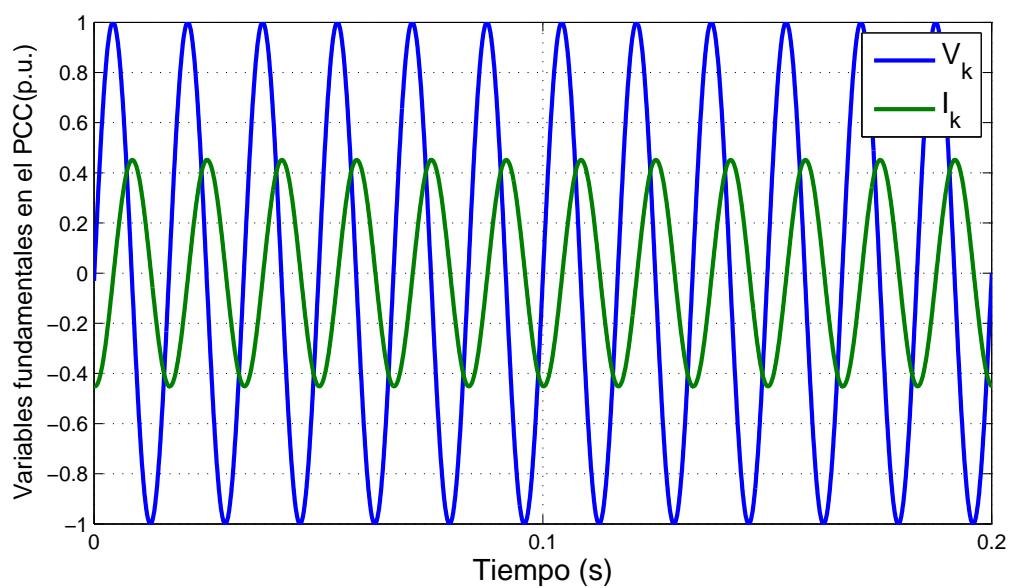


Figura 4.3. Comparación de la intensidad suministrada por el STATCOM y la tensión en el PCC

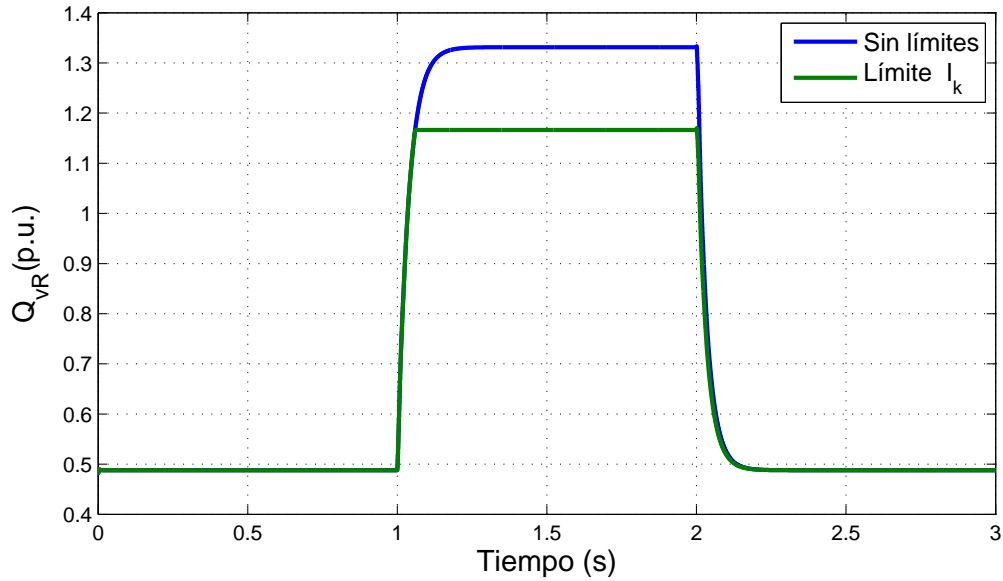


Figura 4.4. Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad

Si se considera exclusivamente el límite de la intensidad máxima soportada por los IGBTs, el STATCOM no sería capaz de suministrar la potencia reactiva necesaria para acometer la caída de tensión, como se muestra en la Figura 4.4. Aunque debido a esta restricción el STATCOM no es capaz de mantener la tensión del PCC en su valor nominal, reduce una caída del 4% a un valor inferior al 0.5%, muy cercano al nominal, como se observa en la Figura 4.5.

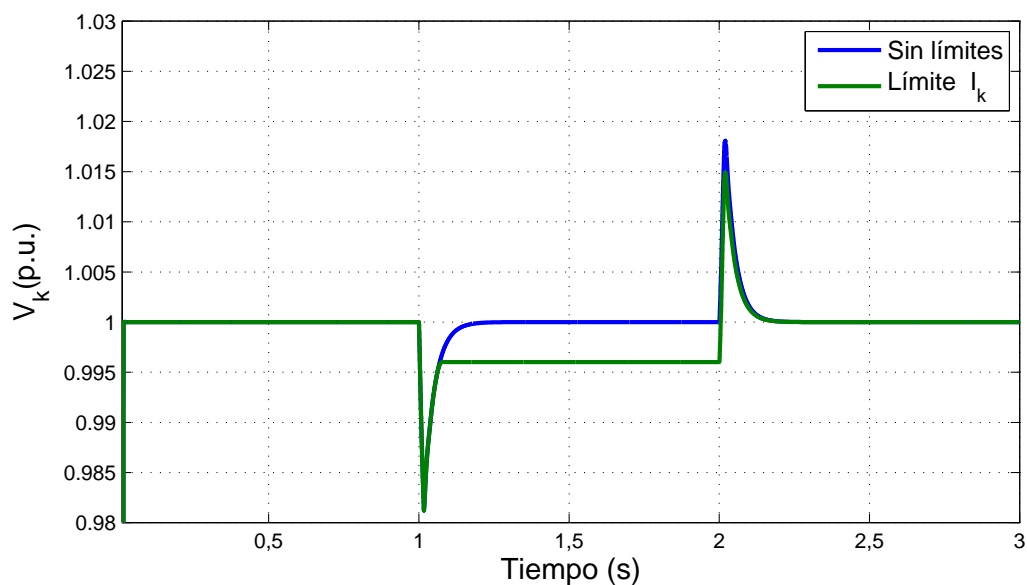


Figura 4.5. Comparación de la regulación de la tensión del PCC por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad

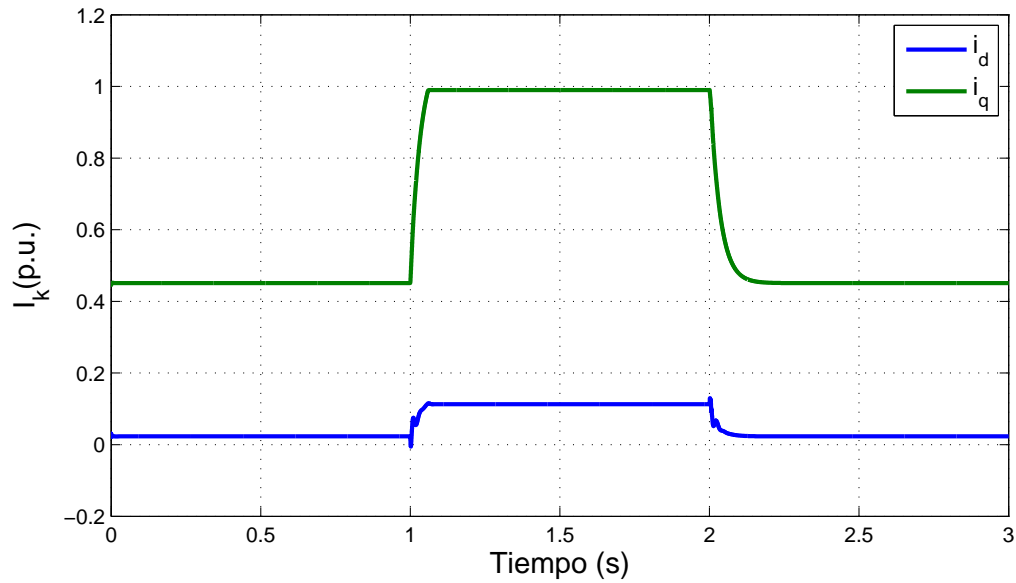


Figura 4.6. Intensidades proporcionadas por el STATCOM a la red, considerando exclusivamente el límite de la intensidad

El control impide sobrepasar el límite de la intensidad máxima soportada por los IGBTs, mostrado en la Tabla 3.1 del punto 3.4, considerando los valores base del Apéndice B, la componente de cuadratura de la intensidad (i_q) no debería superar la unidad en magnitudes por unidad, como se observa en la Figura 4.6. Mientras que como se demuestra en la Figura 4.7, la potencia activa en régimen permanente es nula, porque el regulador de la tensión de continua actúa eficazmente manteniéndola constante ante las perturbaciones del sistema.

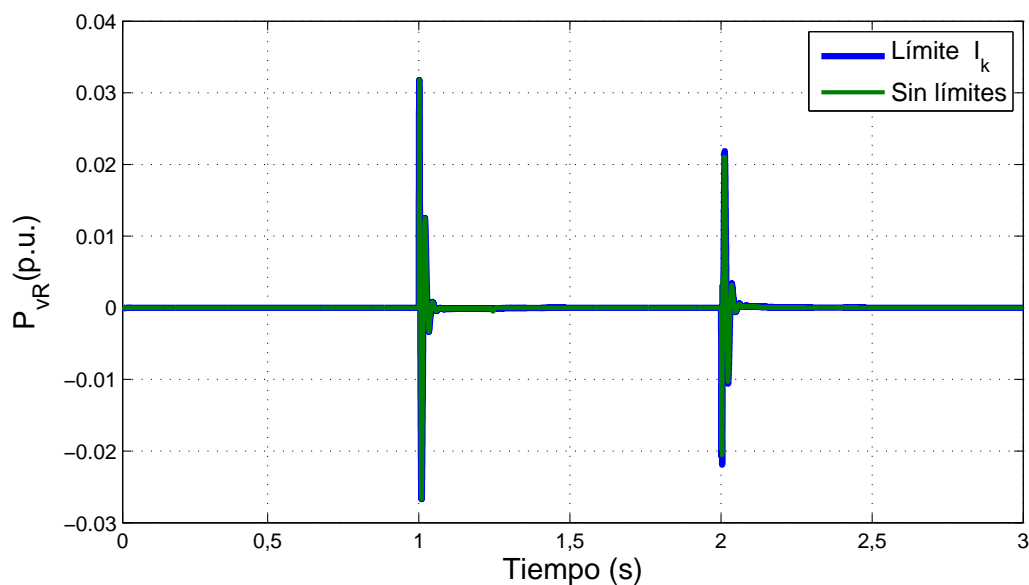


Figura 4.7. Comparación de la potencia activa suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad

4.1.2. Segundo caso

Caso 2	Tiempo(s)								
	0-1			1-2			2-3		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	0	0.3
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.4	0.7	0.3	0	0.3

Tabla 4.2. Caso 2, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red

El segundo caso se resume en la Tabla 4.2, en el que se decide introducir una carga inductiva auxiliar menos severa que en el caso anterior, de una potencia reactiva de 4 kVar. En este ejemplo se compara dos modelos del STATCOM, en uno se ha implementado exclusivamente el límite de la intensidad máxima soportada por los IGBTs (I_k), mientras que en el otro se ha considerado también la limitación de la máxima tensión de salida del convertidor (V_{vR}) para evitar superar el índice de modulación de 0.95.

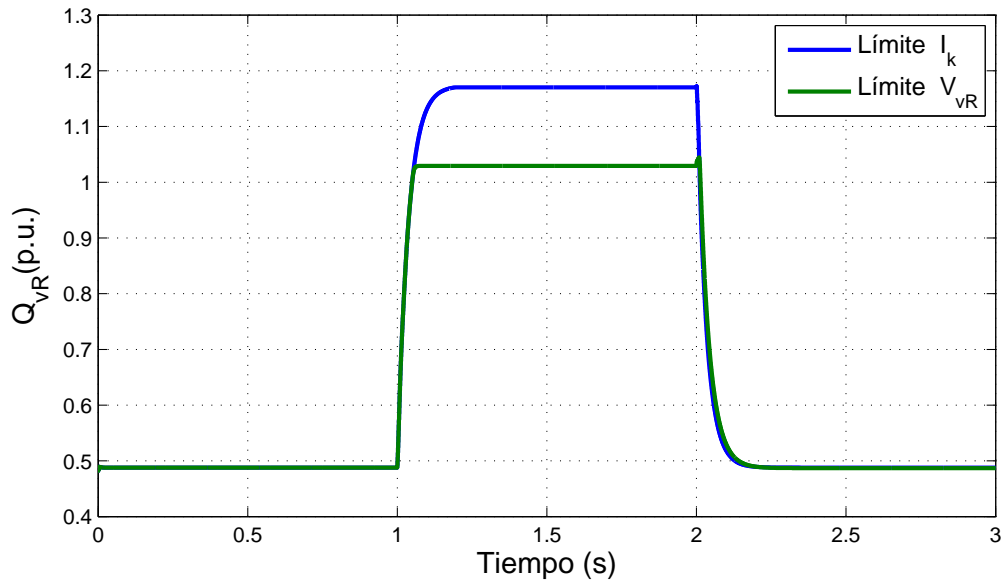


Figura 4.8. Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

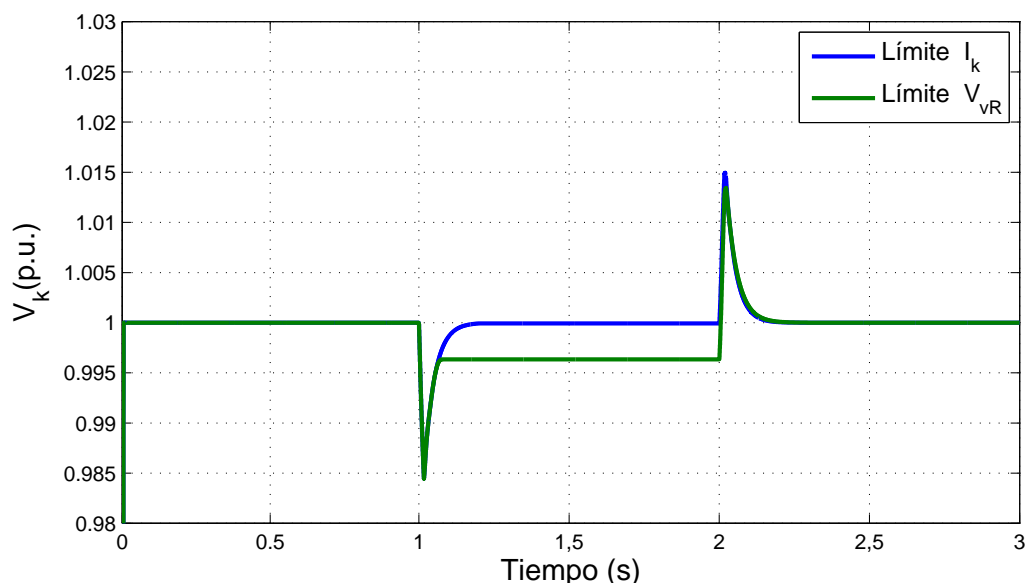


Figura 4.9. Comparación de la regulación de la tensión del PCC por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

Si solo existiese la restricción de la intensidad, el dispositivo podría suministrar la potencia reactiva necesaria para cumplir su objetivo, como se ilustra en la Figura 4.8. Sin embargo, al implementar el límite de la máxima tensión de salida del STATCOM, este no es capaz de proporcionar la potencia reactiva necesaria para cumplir su función.

En este caso de estudio la tensión máxima de salida del convertidor para evitar la sobremodulación es la condición más restrictiva y por este motivo, el modelo donde se implementa dicha restricción no puede mantener la tensión del PCC en su valor nominal, aunque si en un valor bastante próximo, como se observa en la Figura 4.9. Además si se atiende a la Figura 4.10, se observa que la intensidad suministrada por el STATCOM en ningún caso alcanza el máximo valor definido y por lo tanto, no tiene influencia en la limitación de reactiva.

A pesar de que en la simulación se ha empleado la consideración de que el convertidor es una fuente alterna promediada sometida a las ordenes del control, para comprobar que el STATCOM actúa correctamente, se ha elaborado un ensayo del índice de modulación en la Figura 4.11. De dicho ensayo se extrae dos conclusiones importantes, en primer lugar se observa como en el caso del STATCOM con dicho límite, no se sobrepasa el índice de modulación máximo definido en 0.95, de hecho se encuentra en un valor inferior como resultado de las aproximaciones y simplificaciones acometidas en los cálculos teóricos. En segundo lugar, se percibe que en el instante de 2 segundos se produce un transitorio como resultado de la desconexión de la carga auxiliar, que produce una subida del índice de modulación. Si se valora la recurrencia de los huecos de tensión como errores predominantes en la red y la magnitud que suelen presentar, imponer un índice de modulación de 0.95, es una decisión que puede suponer no perder el control en las condiciones o variaciones más extremas.

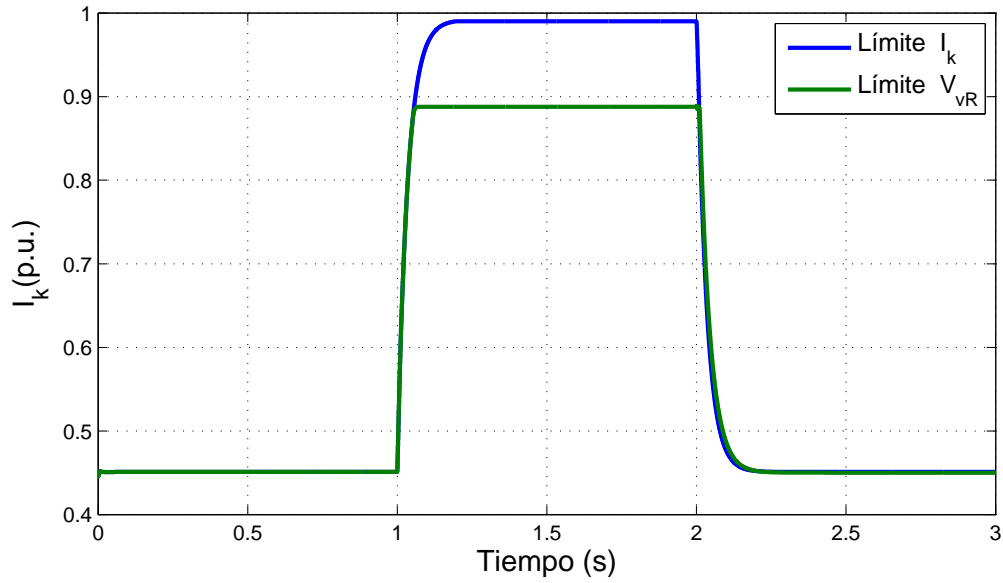


Figura 4.10. Comparación de la intensidad proporcionada por el STATCOM al PCC, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

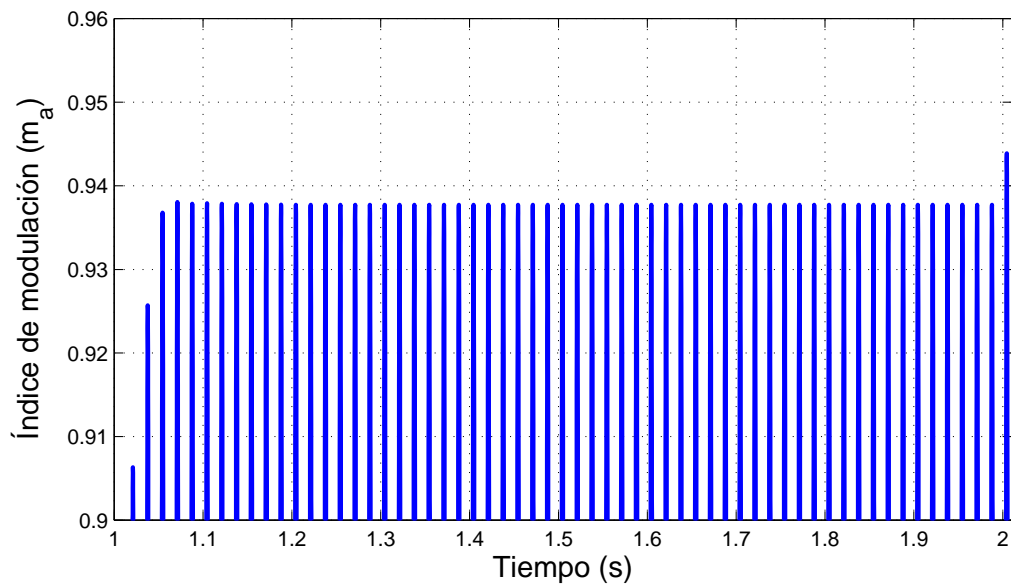


Figura 4.11. Índice de modulación del STATCOM, considerando el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

4.1.3. Tercer caso

En los dos últimos casos de estudio se muestra los resultados obtenidos a raíz de la implementación del convertidor real que opera mediante la técnica de modulación SPWM, a partir de los pulsos obtenidos por el control implementado.

Caso 3	Tiempo(s)								
	0-1			1-2			2-3		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	0	0.3
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.25	0.55	0.3	0	0.3

Tabla 4.3. Caso 3, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red

En el tercer caso correspondiente a la Tabla 4.3, el STATCOM cumple la finalidad de mantener la tensión en su valor nominal sin sobrepasar los límites físicos, como se muestra en la Figura 4.12. En el caso real, la tensión presenta unas fluctuaciones mínimas como consecuencia de los armónicos que se producen por la conmutación del propio convertidor, que presentan frecuencias cercanas a la fundamental y no han sido atenuados por el filtro paso bajo.

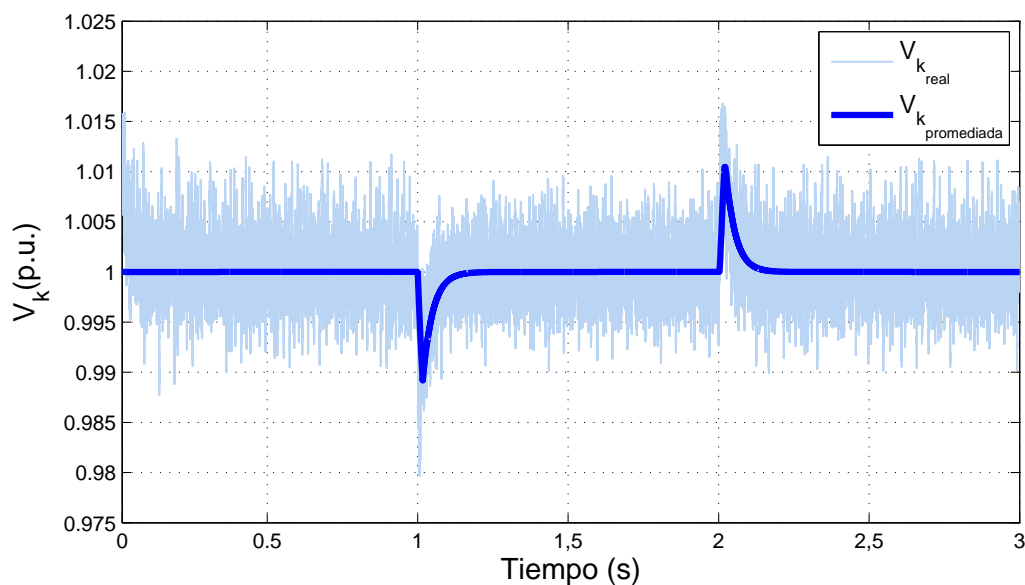


Figura 4.12. Regulación de la tensión del punto de conexión a la red por el STATCOM, considerando sus límites físicos

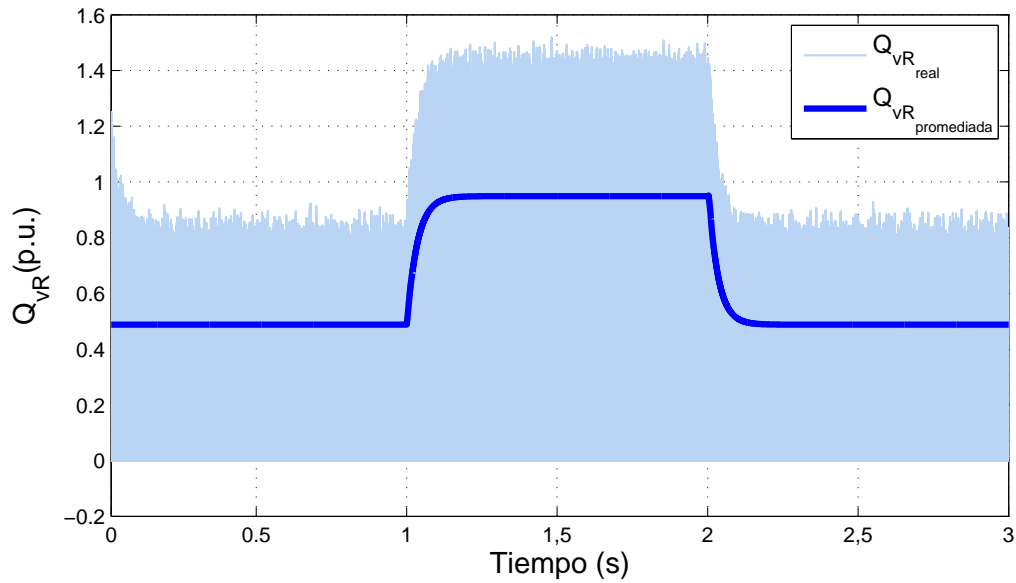


Figura 4.13. Potencia reactiva suministrada por el STATCOM, considerando sus límites físicos

Ante una carga auxiliar inductiva que supone una potencia reactiva total de 5.5 kVar, el STATCOM operaría eficazmente inyectando la potencia reactiva necesaria, como se observa en la Figura 4.13. Cabe destacar el hecho de que para cumplir dicha finalidad el STATCOM debe inyectar 9 kVar de potencia reactiva, sin embargo al PCC solo llega 8 kVar, como se demuestra en la Figura 4.14.

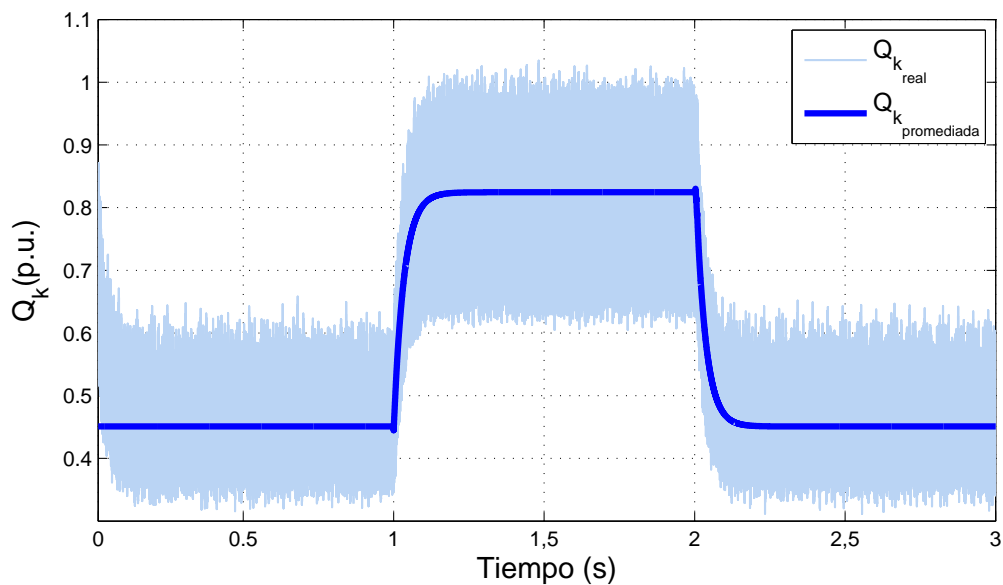


Figura 4.14. Potencia reactiva suministrada por el STATCOM tras la actuación del filtro, considerando sus límites físicos

Este pequeño porcentaje de pérdidas se consume en la componente reactiva de los elementos empleados en la conexión al PCC, entre ellos el filtro paso bajo. Sin embargo, al comparar dicha representación con la Figura 4.14, se puede observar la importancia del empleo del filtro paso bajo para atenuar gran parte de los armónicos de frecuencias elevadas.

En términos generales las pérdidas producidas en el filtro no son considerables, como se evidencia en la Figura 4.15, la cual está enfocada al análisis de la influencia ejercida por el filtro en la potencia reactiva suministrada por el STATCOM. No obstante, si comparamos dicho análisis con la Figura 4.16, se muestra que cuando la magnitud de la intensidad alcanza valores cercanos al máximo admisible por los IGBTs, al existir una relación directamente proporcional, el porcentaje de potencia reactiva consumida por el filtro es elevado. En este caso de estudio, en primera instancia se sitúa por debajo del 8 %, pero en el punto de operación donde la corriente alcanza su valor máximo, dicho porcentaje aumenta hasta superar el 13 %.

Otro dato a señalar son las fluctuaciones o variaciones que se produce en la corriente real, producto de los armónicos con frecuencia inferiores generados por la conmutación y que no han sido eliminados por el filtro paso bajo, como se analizó en 3.8. Dichos armónicos generan errores en las mediciones de las variables fundamentales, utilizadas para la retroalimentación del control, lo que conlleva una dificultad añadida en la definición de los límites y en poder impedir de este modo la sobremodulación.

Dicho análisis demuestra la relevancia de optimizar el filtro paso bajo. Además de que como se ha remarcado en el Capítulo 2, es importante aprovechar detalles técnicos como la topología del convertidor y la técnica de modulación empleada para favorecer la eliminación interna de dichas fluctuaciones.

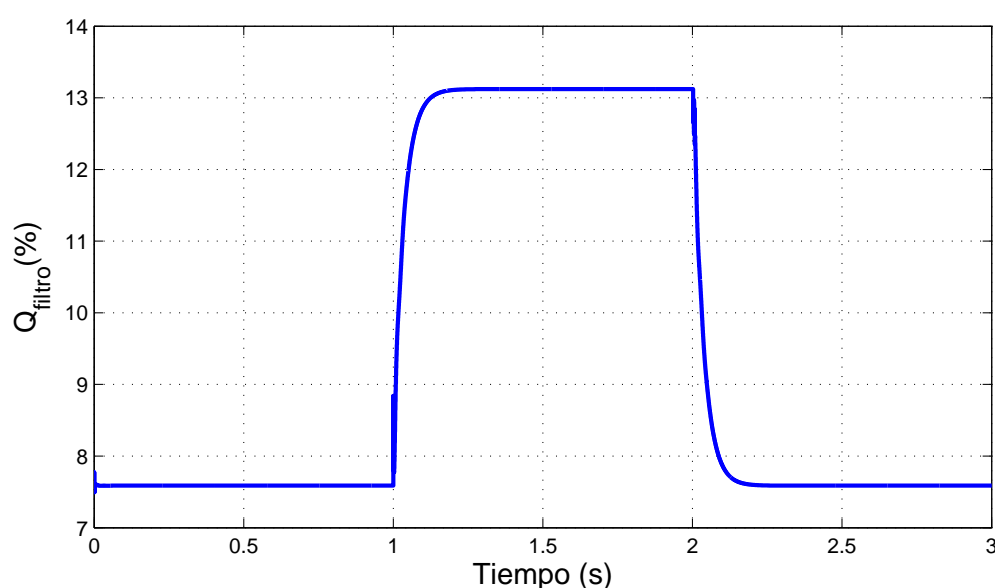


Figura 4.15. Porcentaje de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM que se pierde en el filtro

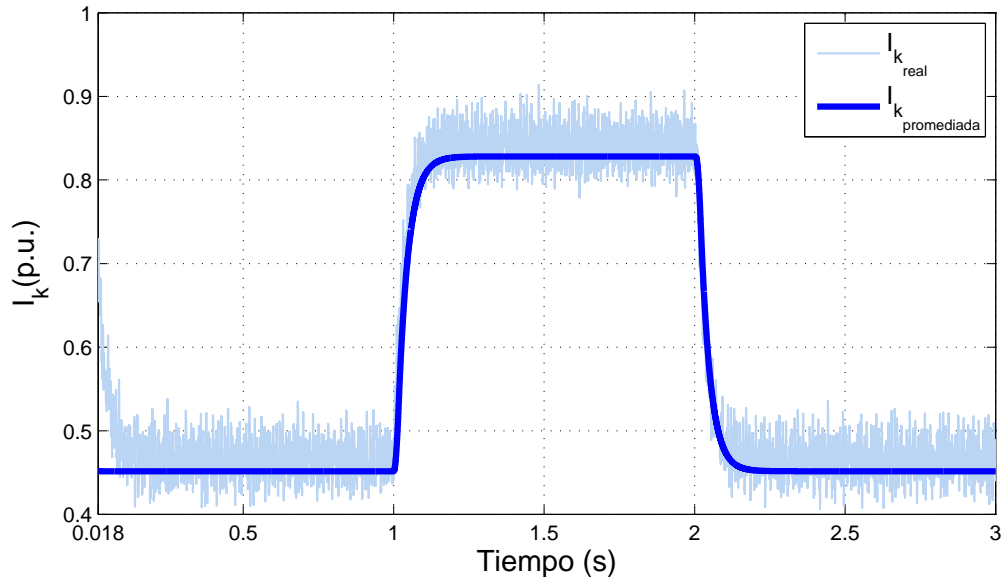


Figura 4.16. Magnitud de la intensidad que circula entre el PCC y el STATCOM

4.1.4. Cuarto caso

Caso 4	Tiempo(s)								
	0-1			1-2			2-3		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	0	0.3
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	-1.4	-1.1	0.3	0	0.3

Tabla 4.4. Caso 4, como controlador de la tensión eficaz del punto de conexión a la red

El último caso resumido en la Tabla 4.4, se trata de la conexión de una carga capacitiva que provoca que el STATCOM que suministraba potencia reactiva, cambie de carácter y comience absorberla en el intervalo de tiempo de 1 a 2 segundos. En la Figura 4.17 se comprueba que el STATCOM al no alcanzar los límites físicos responde adecuadamente.

En dicho periodo de tiempo, la carga total equivale a una potencia capacitiva de 11 kVAr, donde la potencia absorbida por el STATCOM no alcanza los 8 KVar, como se demuestra en la Figura 4.17, esto se debe a las pérdidas de potencia reactiva que se producen en los elementos empleados en la conexión a la red, como el filtro.

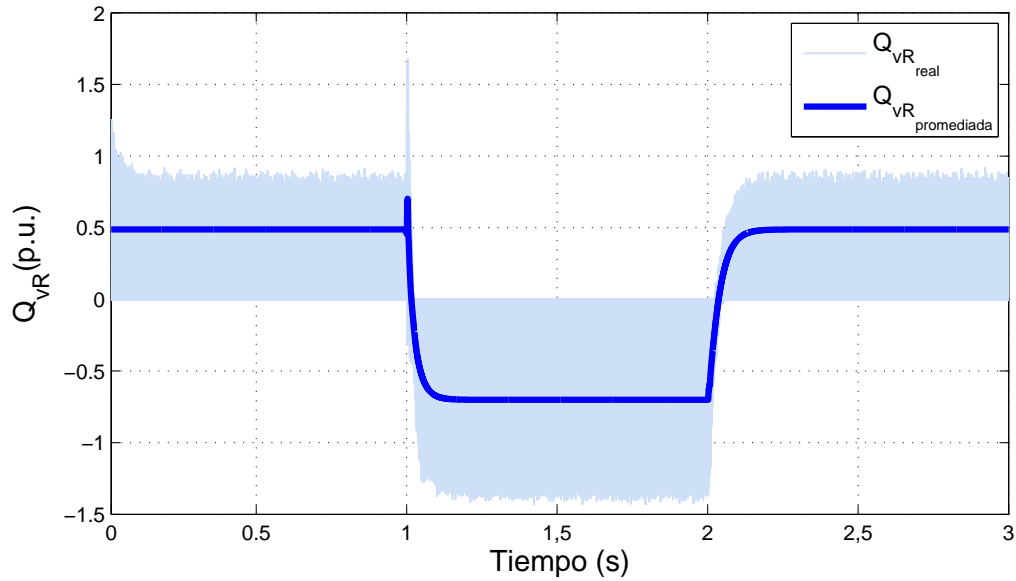


Figura 4.17. Potencias absorbida por el STATCOM, considerando sus límites físicos

El carácter capacitivo de la carga y la función del STATCOM de absorber energía se evidencia en el desfase entre la tensión y la intensidad del PCC, donde esta última se encuentra adelantada respecto a la tensión como se demuestra en la Figura 4.18.

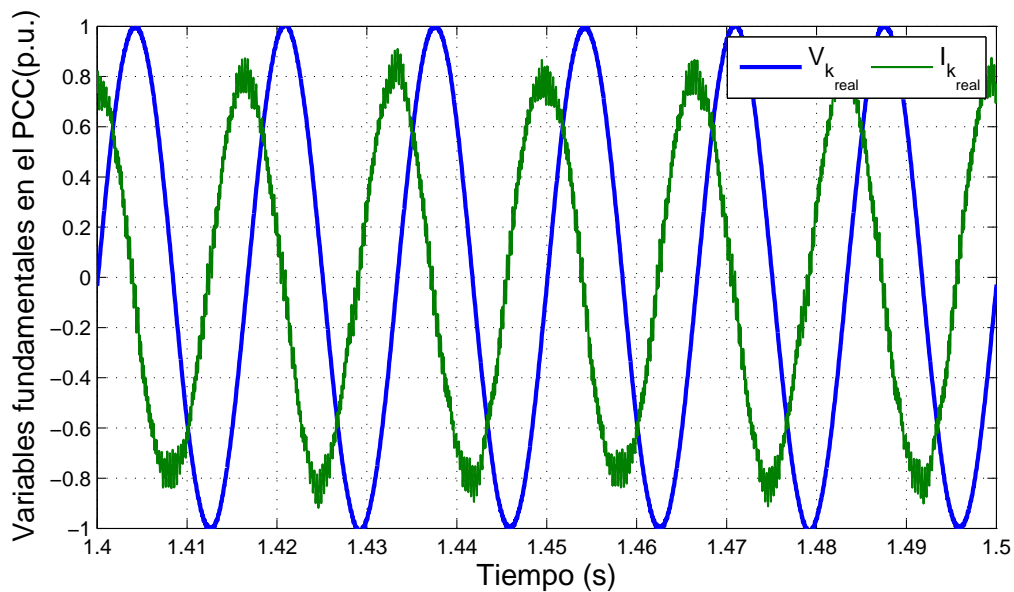


Figura 4.18. Comparación de la intensidad y la tensión en el PCC

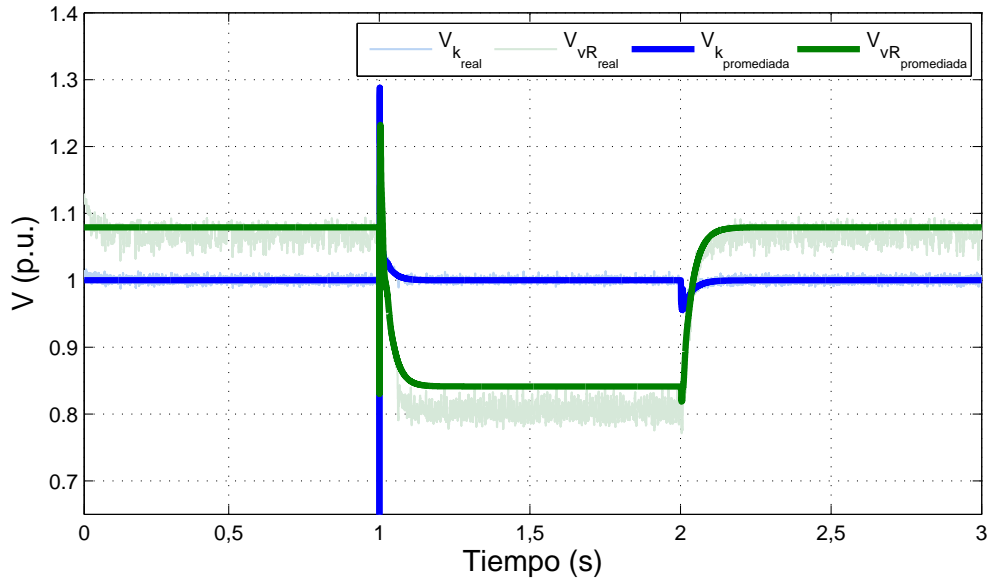


Figura 4.19. Magnitud de la tensión del PCC por la actuación del STATCOM, considerando sus límites físicos

En la Figura 4.19 se demuestra que si la tensión del STATCOM (V_{vR}) es superior a la tensión del PCC (V_k), este suministra potencia reactiva actuando como inversor, mientras que si recibe energía actuando como rectificador, su tensión es inferior a la de la red (PCC), como se analizó en el punto 2.2.1. Esto produce que el límite de V_{vR} es más flexible cuando el STATCOM compensa cargas capacitivas, porque en ese caso el límite sería su valor mínimo, el cual es nulo como se muestra en la Tabla 3.1 del punto 3.4.

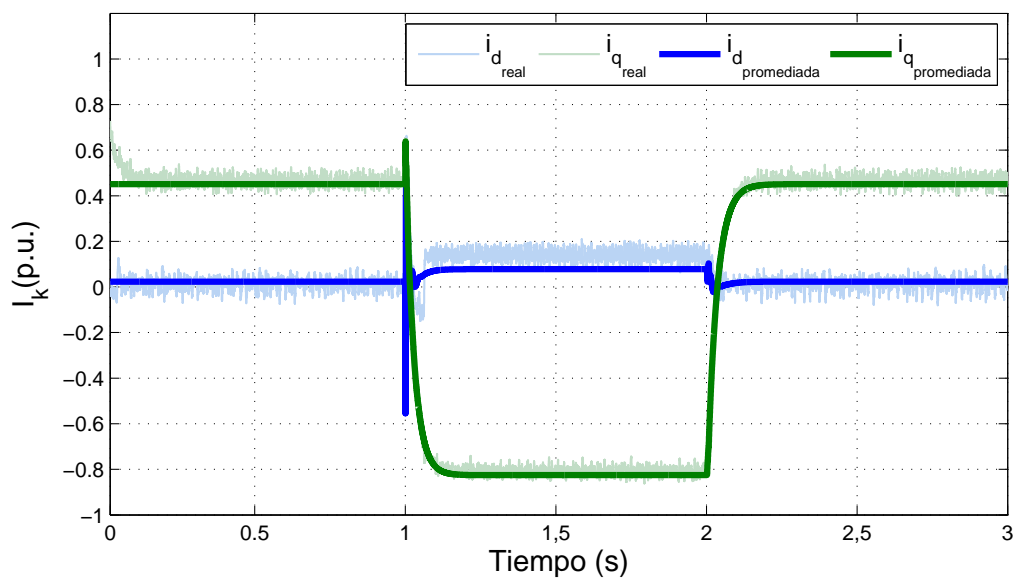


Figura 4.20. Intensidad que circula entre el PCC y el STATCOM, considerando sus límites físicos

Este hecho unido al carácter inductivo de la red y las líneas de transmisión, provoca que si se compara el caso 3 y 4, se comprueba que cuando la carga total equivalente es capacitiva, el STATCOM es capaz de compensar una mayor cantidad de energía reactiva.

Por último, en la Figura 4.20 se observa que las fluctuaciones de las componentes de la intensidad real no son significativas. En dicha representación se muestra como la componente de cuadratura (i_q) cambia de sentido, puesto que el STATCOM deja de suministrar potencia reactiva para comenzar a absorberla, mientras que la componente directa (i_d) no varía su signo, porque la red sigue suministrando la potencia activa consumida por los dispositivos utilizados en la conexión del STATCOM al PCC, tales como el filtro.

4.2. STATCOM como corrector del factor de potencia

Esta sección analiza la actuación del control del STATCOM cuando se emplea para corregir el factor de potencia del PCC. En las simulaciones se analiza la respuesta del STATCOM frente a la conexión de cargas de distintos carácter, estudiando la influencia de los límites de la tensión máxima de salida del convertidor y la intensidad máxima permitida por los IGBTs, como ocurría en la sección anterior.

4.2.1. Primer caso

Caso 1	Tiempo(s)								
	0-1			1-2			2-3		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	0.2	0.5
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.9	1.2	0.3	0	0.3

Tabla 4.5. Caso 1, como corrector del factor de potencia

El primer caso de estudio se resume en la Tabla 4.5, en el que se conecta una carga inductiva auxiliar que consume una potencia reactiva de 9 kVAr y una potencia activa de 2 kW. La carga auxiliar se desconectará posteriormente transcurrido un intervalo de un segundo, para demostrar la eficiencia y dinámica del control implementado.

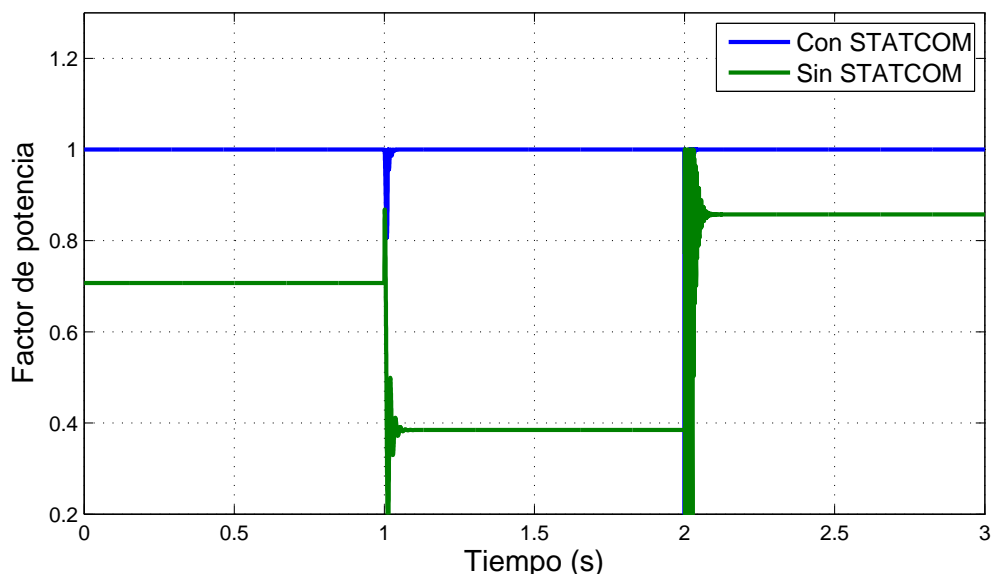


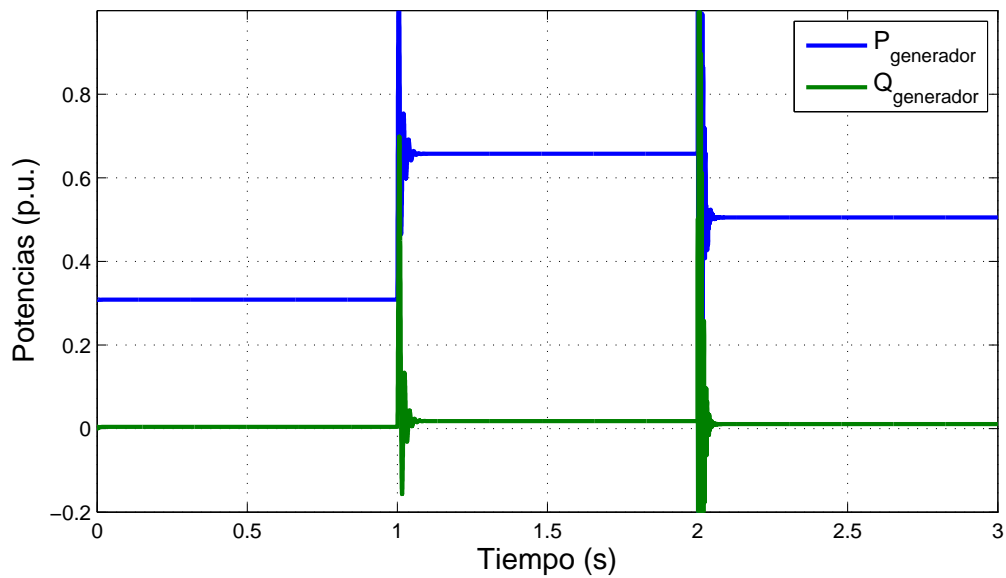
Figura 4.21. Demostración de la actuación eficiente del STATCOM, como corrector del factor de potencia

En la Figura 4.21, se analiza como el empleo del STATCOM permite obtener un factor de potencia unitario, a pesar de que inicialmente si no se empleara dicho dispositivo este presentaría un valor inferior a 0.8. Incluso tras la incorporación de la carga auxiliar inductiva en el intervalo transcurrido entre los segundos 1 y 2, dicho término sería inferior a 0.4.

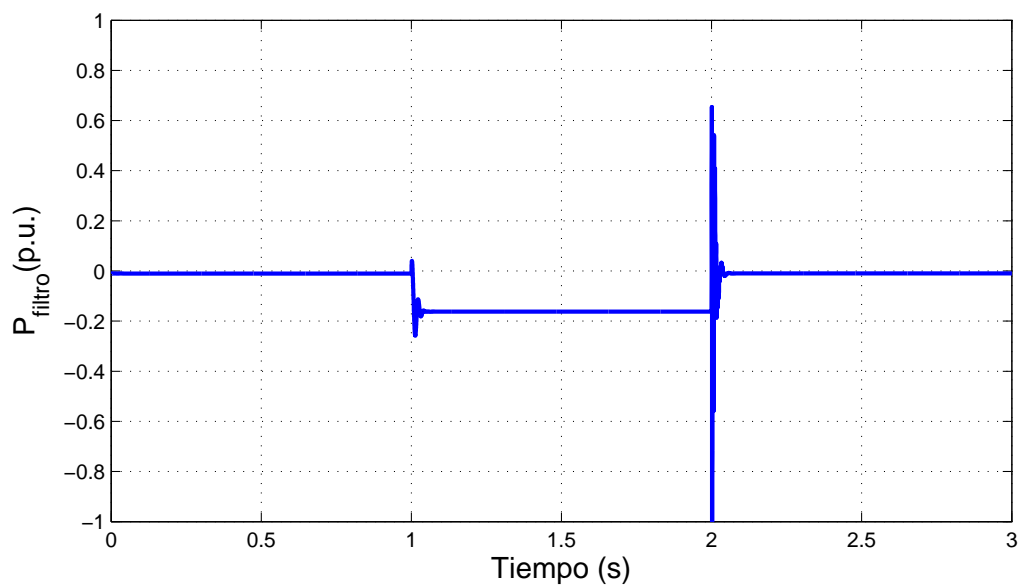
Cabe resaltar el detalle de que al mantenerse la componente de la potencia activa de la carga auxiliar que consume 2 kW, el factor de potencia es mayor en el periodo final donde la potencia activa equivalente es de 5 kW, mientras que en el instante inicial era de 3 kW. De este modo, se demuestra que en tres franjas de tiempo con una carga equivalente de características distintas, el STATCOM cumple el objetivo de un factor de potencia unitario.

Dicho factor de potencia supone que la potencia reactiva del generador es nula, operando a plena capacidad para suministrar exclusivamente la potencia activa o útil exigida por el sistema, como se observa en la Figura 4.22 (a) y como queda expuesto en la sección 2.2.1. Sin embargo, en dicha representación se muestra un pequeño error despreciable que provoca que la potencia reactiva del generador no sea del todo nula, esto es consecuencia de las pérdidas reactivas de los elementos empleados en la conexión al PCC, las cuales dependen de las variaciones de las tensiones y las intensidades, estas últimas especialmente significativas en el intervalo de 1 a 2 segundos.

A pesar de que la carga equivalente consume una potencia activa de 5 kW, el generador suministra casi 7 kW como consecuencia de tener que subsanar las pérdidas de los elementos conectados al PCC, especialmente el filtro. Este elemento supone casi 2 kW adicionales que el generador debe subsanar, cuando la corriente es elevada, como se observa en la Figura 4.22 (b).



(a) Potencias suministrada por la red tras la actuación del STATCOM ideal, sin límites físicos



(b) Potencia activa consumida en el filtro

Figura 4.22. Efecto del filtro en la potencia del generador

Un dato significativo es que para corregir el factor de potencia de una carga inductiva de una potencia reactiva equivalente de 12 KVar, el STATCOM inyecta una potencia reactiva algo superior a 14 KVar, como se observa en la Figura 4.23, mientras que en el primer caso del anterior punto 4.1, para una carga inductiva bastante inferior de 8 KVar, el STATCOM necesitaba inyectar más de 13 KVar, como se presentaba en la Figura 4.4. El STATCOM necesita inyectar menos potencia reactiva para corregir el factor de potencia que para regular la tensión eficaz del PCC. La explicación teórica de que cumplir esta función requiera menos energía, se debe a que para regular el factor de potencia en su valor unitario, solo se necesita compensar la carga inductiva y lograr una potencia reactiva nula en el PCC, mientras que mantener la tensión del PCC en el valor nominal exige un esfuerzo adicional de potencia reactiva. Otro motivo menos relevante es que la intensidad necesaria entre el STATCOM y la red para corregir el factor de potencia es menor y por lo tanto, se produce una menor cantidad de pérdidas en la conexión al PCC.

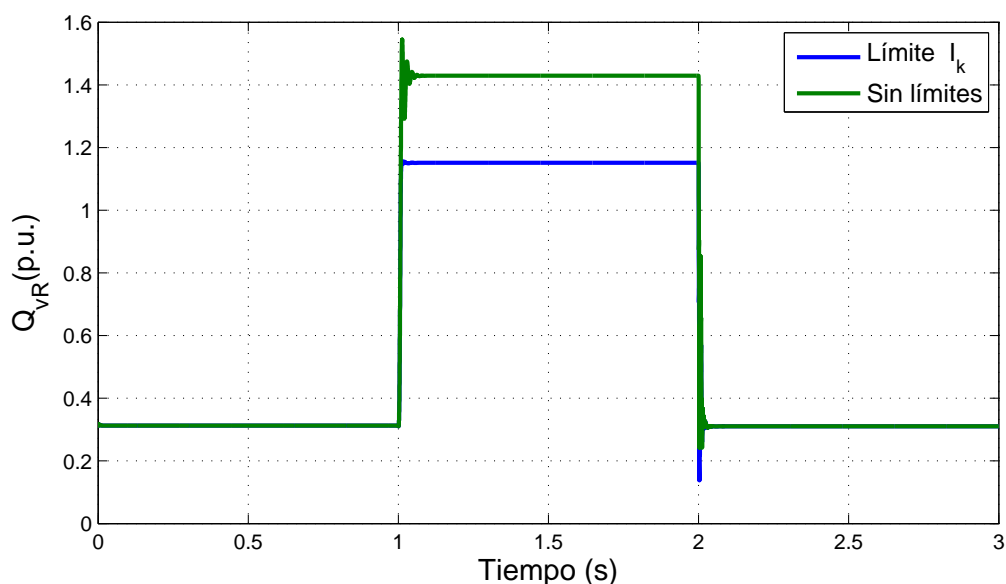


Figura 4.23. Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad

En la Figura 4.23 se muestra que si se considera el límite de la máxima intensidad soportada por los IGBTs, el STATCOM no es capaz de inyectar la potencia reactiva necesaria de 14 kVar para corregir el factor de potencia, solo alcanza a suministrar un valor algo inferior a 12 kVar.

A pesar de las variaciones que se producen en la tensión de la etapa de continua (V_{DC}), el control mantiene constante dicho término, logrando que como es lógico por las propias características del convertidor, la potencia activa en régimen permanente sea nula, como se observa en la Figura 4.24.

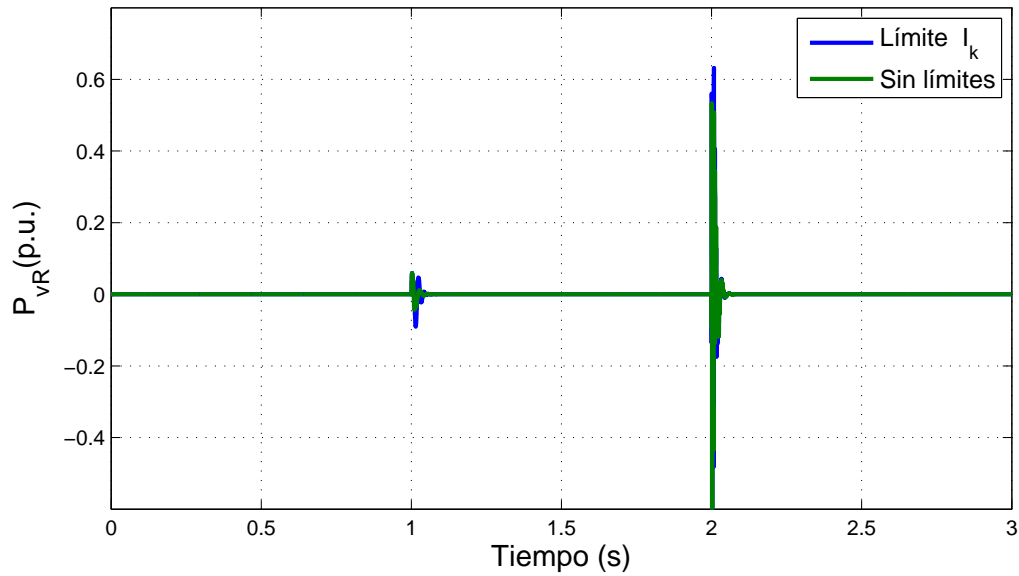


Figura 4.24. Comparación de la potencia activa suministrada por el STATCOM, sin límites físicos o considerando exclusivamente el límite de la intensidad

La implementación del límite de la máxima intensidad soportada por los IGBTs se cumple, puesto que si se emplea los valores base del Apéndice B en dicho valor mostrado en la Tabla 3.1 del punto 3.4, la componente de cuadratura de la intensidad (i_q) no debería superar la unidad en magnitudes por unidad, como se muestra en la Figura 4.25.

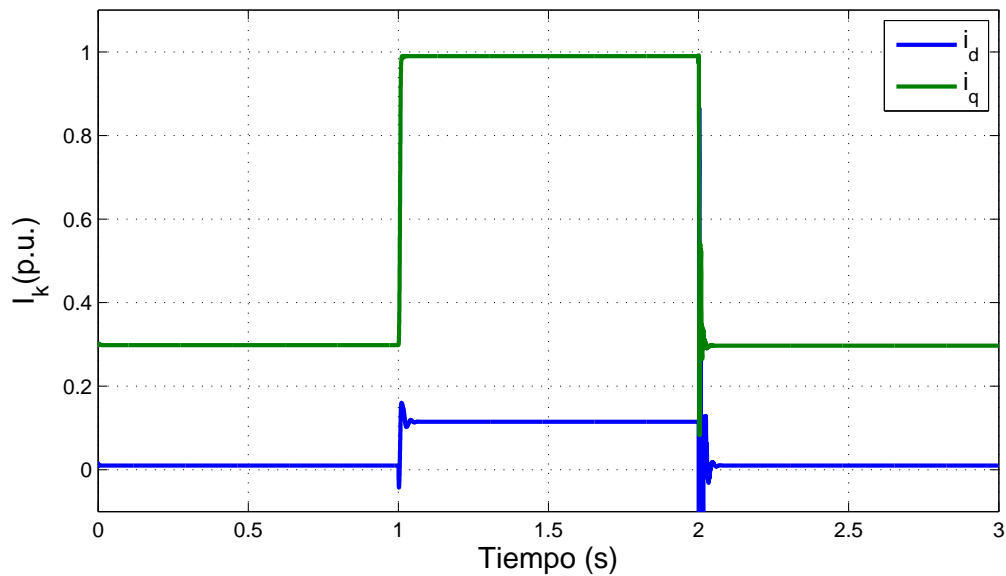


Figura 4.25. Intensidades proporcionadas por el STATCOM a la red, considerando exclusivamente el límite de la intensidad

4.2.2. Segundo caso

Caso 2	Tiempo(s)								
	0-1			1-2			2-3		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.7	1	0.3	0	0.3

Tabla 4.6. Caso 2, como corrector del factor de potencia

El segundo caso se resume en la Tabla 4.6, en el que se introduce una carga inductiva auxiliar menor de una potencia reactiva de 7 kVAr. Este punto sirve para establecer una comparación entre dos modelos, en el primero se ha implementado el límite de la máxima intensidad soportada por los IGBTs y en el segundo se incluye la restricción de la máxima tensión de salida del STATCOM permitida para evitar la sobremodulación. Como se muestra en la Figura 4.26, si el STATCOM presentará solo la restricción de la intensidad, cumpliría el objetivo de corregir el factor de potencia, no obstante cabe señalar que el modelo donde se implementa el límite de la máxima tensión de salida del STATCOM aunque no cumple dicho objetivo, logra un factor de potencia aceptable próximo a la unidad.

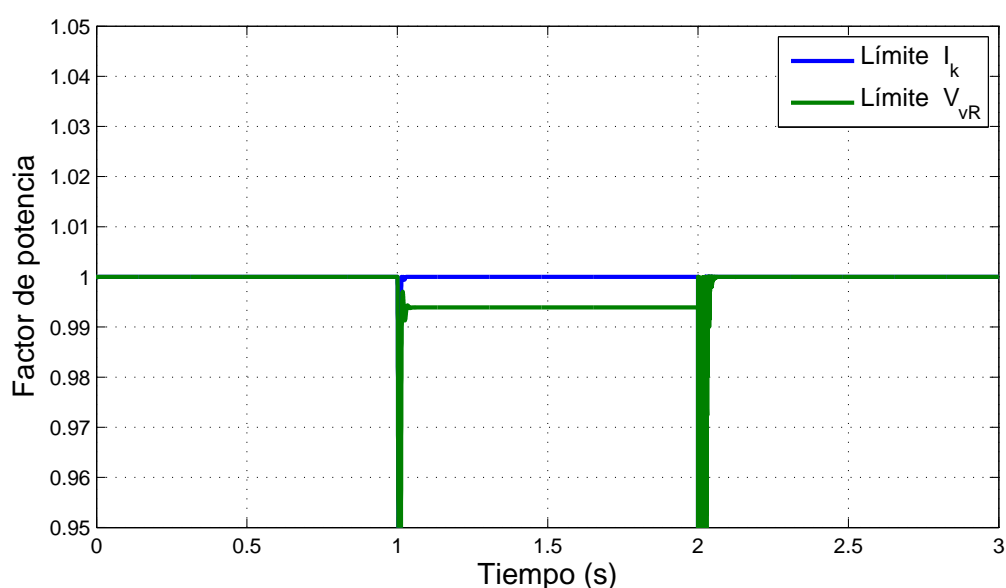


Figura 4.26. Factor de potencia proporcionado por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

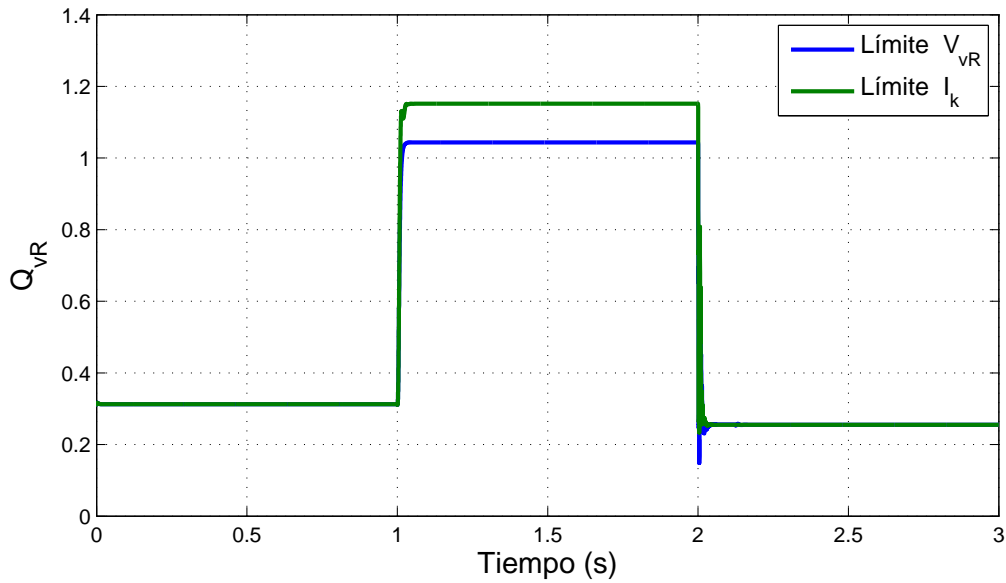


Figura 4.27. Comparación de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

El motivo por el que al considerar dicha restricción no cumpla su finalidad, se debe a que el STATCOM no tiene la capacidad de suministrar la potencia reactiva necesaria para compensar totalmente la carga, como se observa en la Figura 4.27. No obstante, el control mantiene la tensión de continua de ambos modelos constante, logrando que la potencia activa del convertidor sea nula, como se muestra en la Figura 4.28.

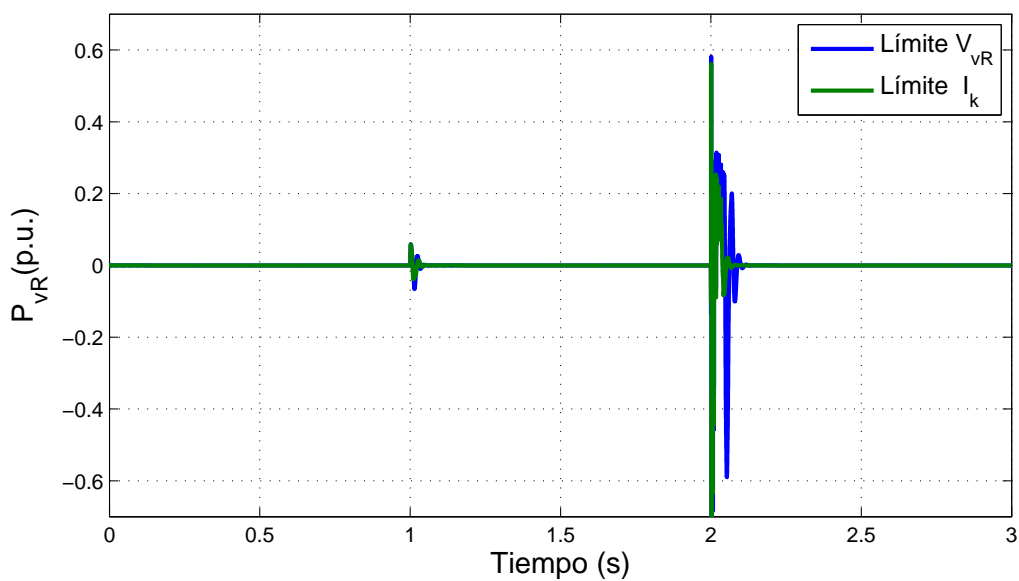


Figura 4.28. Comparación de la potencia activa suministrada por el STATCOM, considerando el límite de la intensidad o el límite de la tensión máxima de salida del convertidor

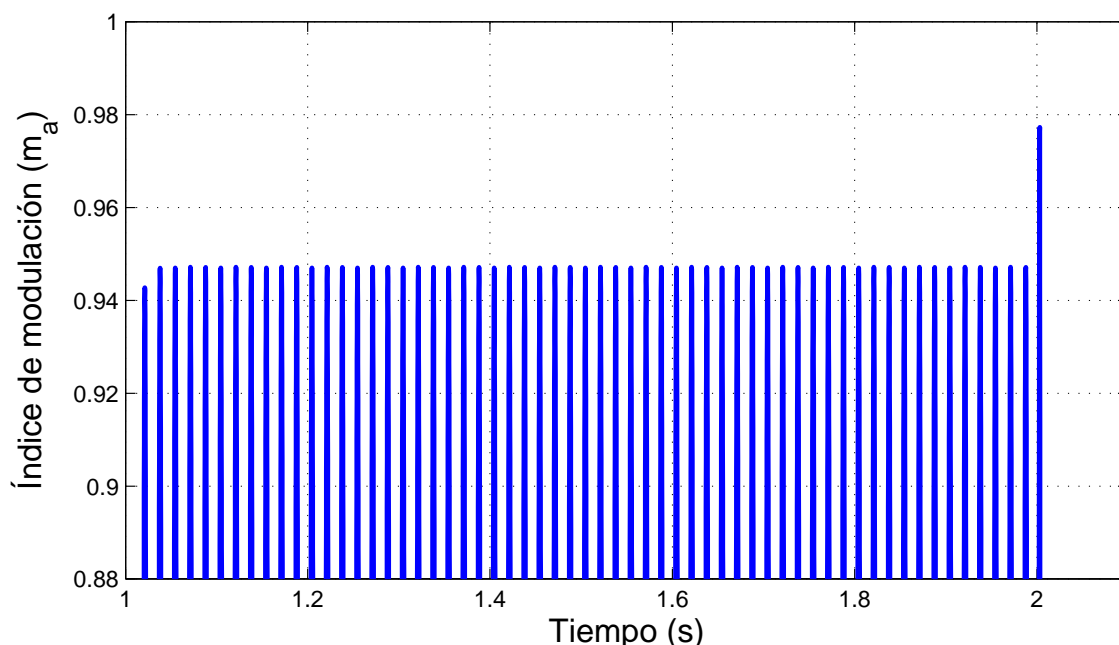


Figura 4.29. Índice de modulación del STATCOM, considerando ambos límites físicos

El límite de la máxima tensión de salida del STATCOM para evitar la sobremodulación impide alcanzar la potencia reactiva exigida, puesto que dicha condición es la más restrictiva, como se demuestra en la Figura 4.29. En dicha representación se observa que se cumple que el índice de modulación no supera el valor máximo definido en 0.95. Un dato interesante que refuerza la idea de elegir por seguridad un índice de modulación inferior a la unidad, se observa en el instante en el que se produce un transitorio por la desconexión de la carga el cual provoca una subida que supera el límite impuesto, pero sin lograr superar el índice de modulación unitario, evitando la sobremodulación.

4.2.3. Tercer caso

Los dos últimos ejemplos presentados en 4.2 se han simulado en un periodo de dos segundos, donde se añade la actuación convertidor real que emplea la técnica de modulación SPWM. El tercer caso se resume en la Tabla 4.7. En la Figura 4.30, se demuestra que el STATCOM cumple la finalidad de mantener el factor de potencia en su valor unitario, sin sobrepasar los límites físicos ante una carga auxiliar inductiva de una potencia reactiva total de 9 kVAr. En el caso real, la propia modulación genera armónicos en la potencia proporcionada por el convertidor provocando que el factor de potencia no sea compensado de manera uniforme y constante, como si ocurre en el caso promediado.

Caso 3	Tiempo (s)					
	0-1			1-2		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.3	0.6
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.6	0.9

Tabla 4.7. Caso 3, como corrector del factor de potencia

De los 10 kVAr de potencia reactiva suministrados por el STATCOM como se presenta en la Figura 4.31, solo 9 kVAr llegan a la red por las pérdidas que se producen en los elementos empleados en la conexión al PCC, como se observa en la Figura 4.32. La comparativa de ambas figuras demuestra la atenuación de una cantidad relevante de armónicos de frecuencias elevadas en el filtro pasivo utilizado.

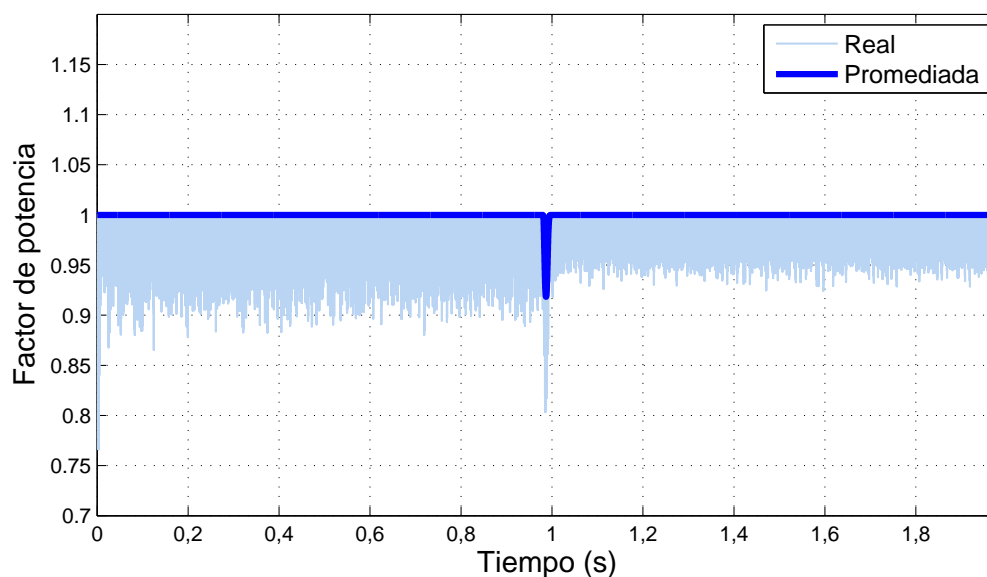


Figura 4.30. Factor de potencia proporcionado por el STATCOM, considerando sus límites físicos

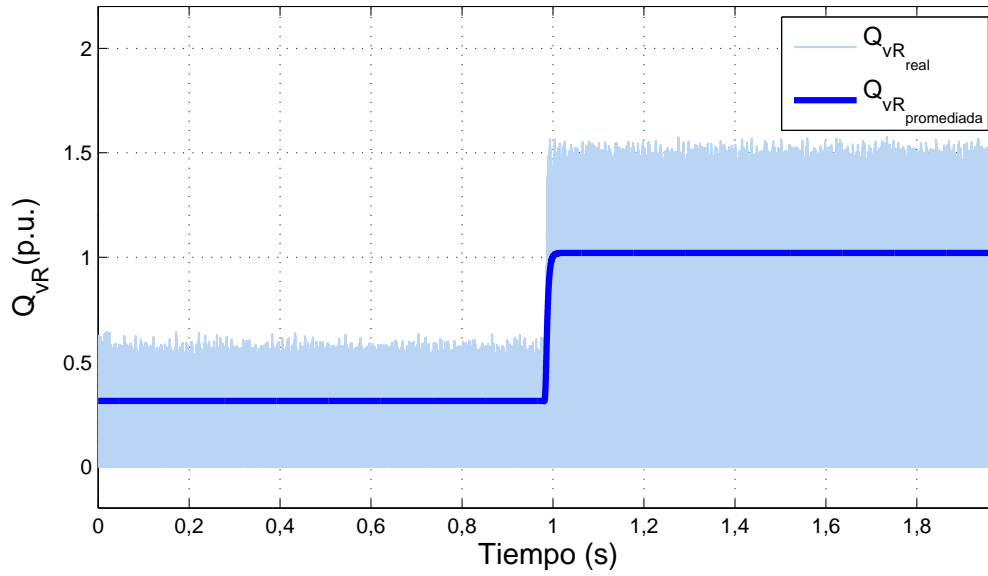


Figura 4.31. Potencias suministradas por el STATCOM, considerando sus límites físicos

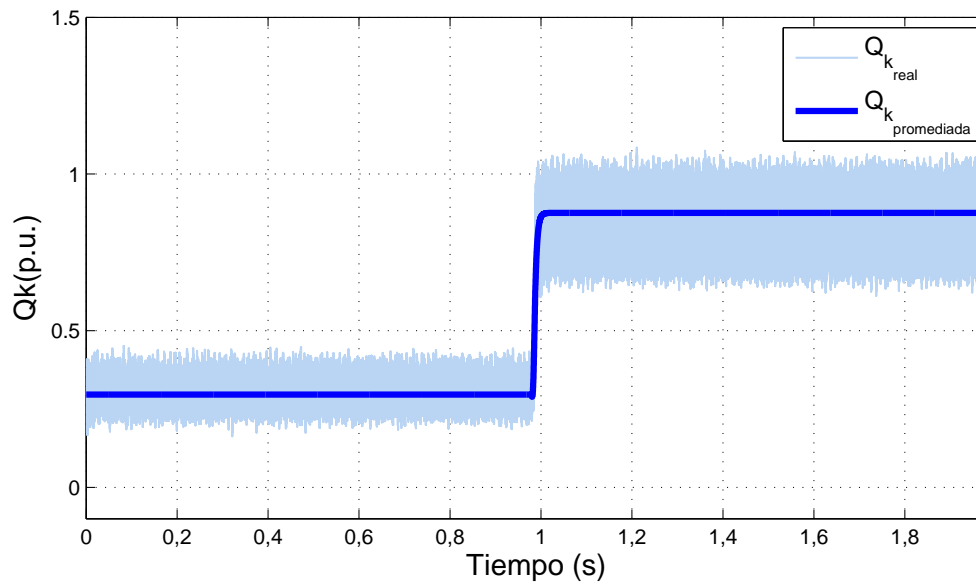


Figura 4.32. Potencias suministradas por el STATCOM tras la actuación del filtro, considerando sus límites físicos

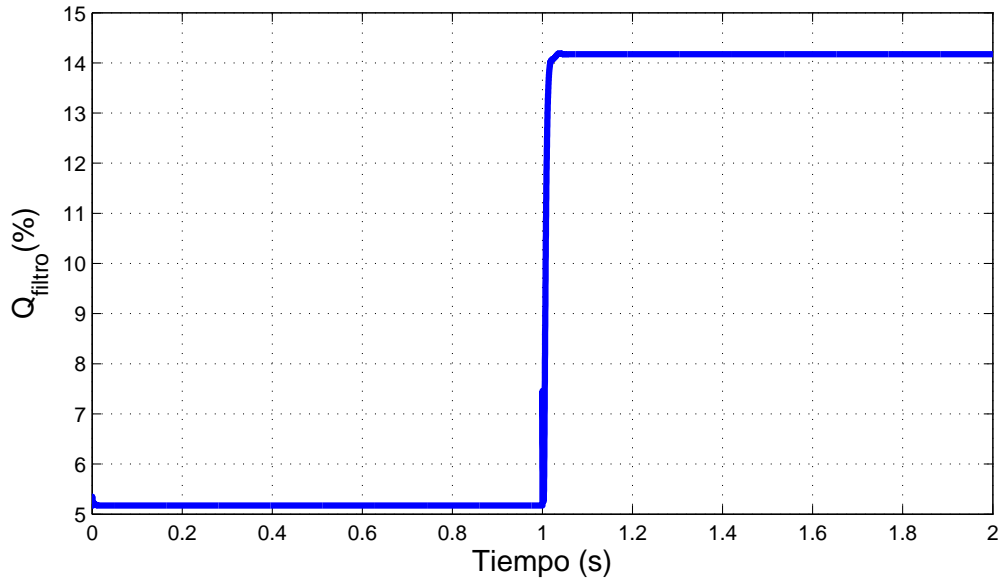


Figura 4.33. Porcentaje de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM que se pierde en el filtro

En la Figura 4.33 se presenta un estudio del porcentaje de la potencia reactiva inyectada por el STATCOM que se desperdicia en el filtro, alcanzando su máximo en 14 % para una intensidad elevada. Cabe destacar que en el instante inicial dicho valor se sitúa en torno al 5 % cuando la magnitud de la intensidad es de 0.3 en magnitudes por unidad, como se muestra en la Figura 4.34.

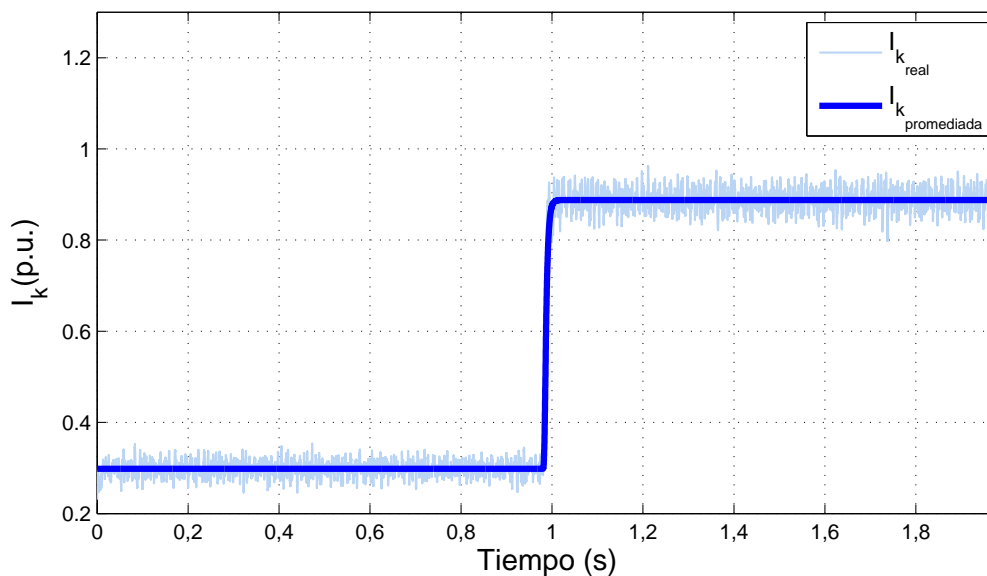


Figura 4.34. Magnitud de la intensidad que circula entre el punto de conexión a la red y el STATCOM

Para una carga inductiva equivalente pero con el STATCOM actuando como regulador de la tensión del PCC, el valor era ligeramente inferior al 8 % como se presenta en la Figura 4.16, porque la corriente era de 0.45 en magnitudes por unidad. Esta diferencia recae en la necesidad de una potencia reactiva e intensidad menor para cumplir la función de corregir el factor de potencia, respecto a la requerida para regular la tensión del PCC en su valor nominal.

4.2.4. Cuarto caso

<u>Caso 4</u>	Tiempo (s)					
	0-1			1-2		
	CI	CA	CT	CI	CA	CT
P(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	0.3	0.6
Q(p.u.)	0.3	0	0.3	0.3	-1	-0.7

Tabla 4.8. Caso 4, como corrector del factor de potencia

El último caso resumido en la Tabla 4.8, refleja la actuación del STATCOM ante la aparición de una carga capacitiva, que para lograr su compensación deja de operar como inversor y comienza actuar como rectificador absorbiendo energía en el intervalo de tiempo de 1 a 2 segundos, como se ejemplifica en la Figura 4.35.

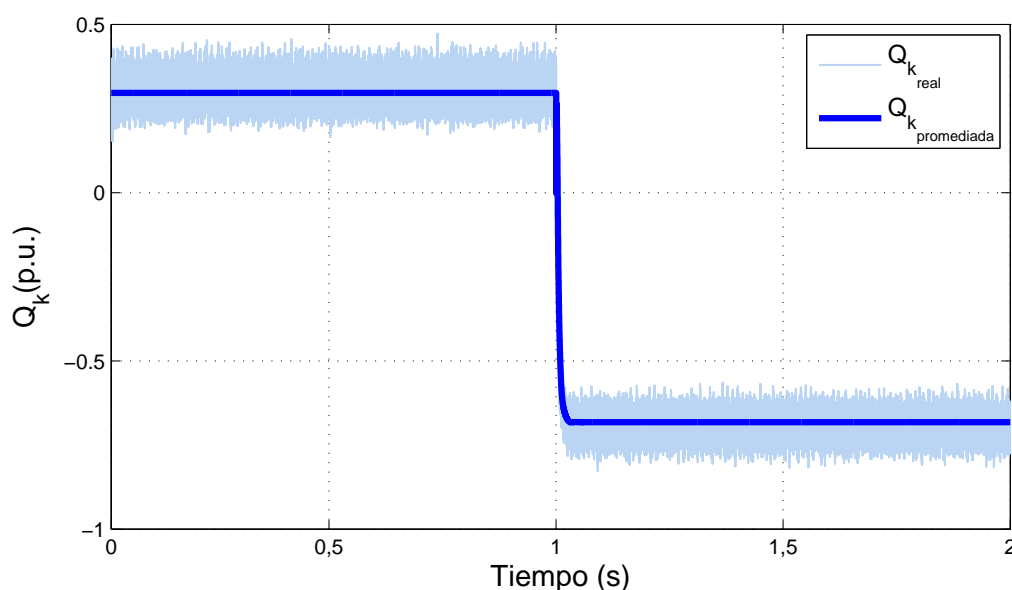


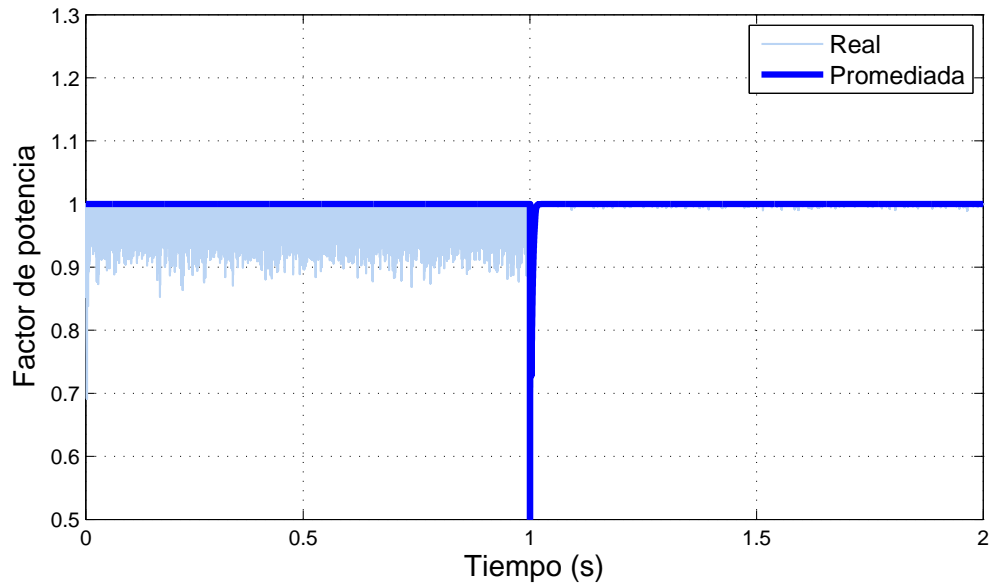
Figura 4.35. Potencias suministradas por el STATCOM, considerando sus límites físicos

En este caso la potencia absorbida por el convertidor es de 6 kVAr, cuando la potencia reactiva total de la carga equivale a 7 kVAr, donde la pérdida de potencia reactiva en el filtro provoca un descenso de la energía que llega al propio convertidor.

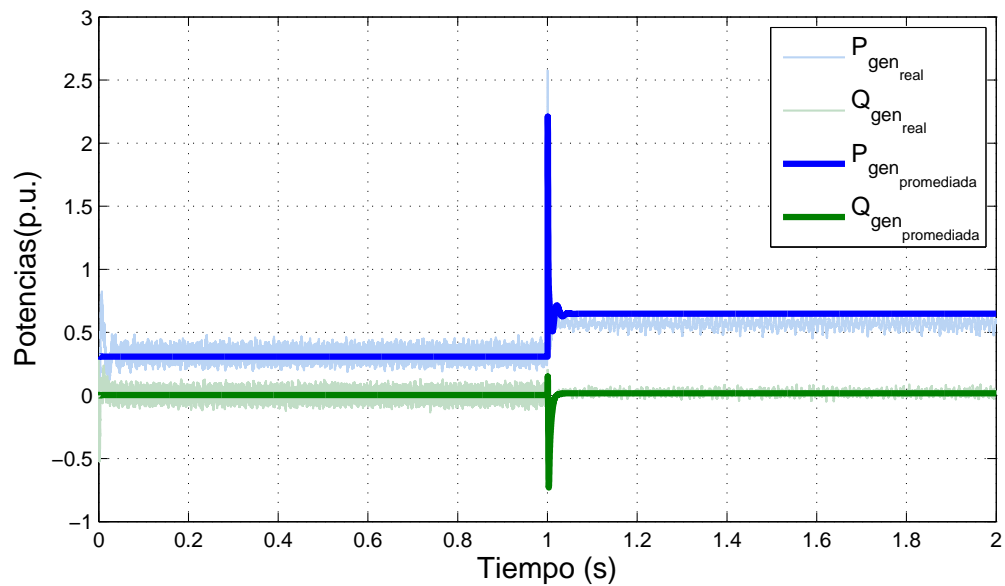
En la Figura 4.36 queda demostrado que a pesar del cambio de sentido de la corriente, opera eficazmente manteniendo el factor de potencia unitario y logrando la meta de que el generador solo tenga que inyectar potencia útil o activa. En este caso la pérdidas de la potencia activa del filtro que el generador aporta no son considerables.

Cabe destacar que en el caso real al cambiar el sentido de giro de la intensidad, la distorsión se reduce considerablemente logrando que la potencia reactiva del generador sea nula y el factor de potencia unitario, semejante al resultado del caso promediado, como se muestra en la Figura 4.36. No obstante, la potencia reactiva absorbida de la red por el STATCOM presenta distorsiones, parecidas a los casos anteriores, como se observa en la Figura 4.35.

Por último, cabe resaltar que si se compara estos dos últimos casos, como ocurría cuando el STATCOM actuaba como regulador de la tensión eficaz del PCC, cuando la carga auxiliar es capacitiva, el STATCOM es capaz de compensar una mayor cantidad de energía reactiva, como se analizó en el punto 4.1.4.



(a) Corrector del factor de potencia por el STATCOM, considerando los límites físicos



(b) Potencias suministrada por el generador tras la actuación del STATCOM, considerando los límites físicos

Figura 4.36. Efecto de corregir el factor de potencia, en la actuación del generador

Capítulo 5

Conclusión

Este proyecto sirve como representación del control de las dos principales funciones de un STATCOM conectado a una red. El siguiente capítulo es un resumen de los objetivos cumplidos, posibles mejoras en el control del modelo implementado y por último, algunos de los trabajos futuros que podrían realizarse para ampliar la información ofrecida en este estudio.

5.1. Objetivos cumplidos

Los principales objetivos logrados en este proyecto que pueden resultar beneficiosos para posibles futuros estudios académicos, se resumen en:

- Análisis del problema y principales funciones del STATCOM, analizando su dimensionamiento y funcionamiento.
- Desarrollo del modelo matemático del STATCOM donde se muestra conceptos como los métodos de ajuste de los reguladores PI, la implementación de los límites físicos o anti-windup, cuya información puede ser extrapolable al control de cualquier planta real.
- Implementación mediante Matlab/Simulink del funcionamiento de un convertidor que opera mediante la técnica de modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM).
- Análisis de las principales características de la actuación del STATCOM ante los distintos casos de estudios presentados.

5.2. Posibles mejoras del modelo presentado

En el hipotético caso de querer implementar un STATCOM capaz de ofrecer una respuesta tras la modulación con menor distorsión a la mostrada, se expone una serie de posibles mejoras en distintos aspectos fundamentales:

- La estructura utilizada se corresponde a convertidores convencionales en fuente de tensión de dos niveles como se analiza en el punto 2.3.1, en lugar de los convertidores multinivel. Esta última alternativa permite la posibilidad de operar en un mayor número de niveles en la tensión en la etapa de continua, dicha propiedad favorece que la señal de salida del convertidor se aproxime bastante a la de una onda sinusoidal con un mínimo contenido de distorsión armónica [15]. No obstante, el aumento del número de niveles de tensión presenta como desventaja la necesidad de una mayor inversión en el número de condensadores y un aumento de la cantidad de IGBTs, que provocaría que las pérdidas de conmutación sean superiores [15]. Además de que los problemas de desequilibrio que podrían darse en las tensiones y la necesidad de un control más complejo, son cuestiones que deben ser tratadas. A pesar de ello los convertidores multinivel son una opción claramente preferible en aplicaciones de media y alta potencia y sus principales configuraciones son [6]:
 1. Convertidor con diodo anclado (Diode-clamped converter).
 2. Convertidor con condensadores flotantes (Flying capacitor converter).
 3. Convertidor en cascada (Cascade converter).
- En un sistema equilibrado el lazo de seguimiento de fase SRF-PLL planteado en el punto 3.2 actúa eficazmente, pero como se analiza en el Apéndice D ante armónicos cercanos a la frecuencia fundamental su eficacia queda en cuestión. En esta referencia [22] se ofrece el doble sistema de referencia síncrono DSRF-PLL, capaz de detectar con exactitud el módulo y la fase del vector tensión de secuencia positiva, en condiciones complejas como armónicos próximos a la frecuencia fundamental.
- Un punto de estudio fundamental a la hora de eliminar internamente los armónicos producidos por la conmutación del convertidor es la técnica de modulación empleada como se expone en la sección 2.3.3. Frente a la modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM), una opción que se considera preferible es la modulación vectorial (SVM), dado que maximiza el empleo de la tensión de la etapa de continua logrando generar una tensión de salida un 15 % superior en comparación a la producida por el método empleado [13], además de obtenerse un bajo contenido armónico y minimizar las pérdidas por conmutación.
- El filtro L es la opción escogida para filtrar los armónicos producidos por la modulación del convertidor, pero como se analiza en 3.8 existe otras clases de filtros pasivos ampliamente investigados como los LC y los LCL. Si se emplea un filtro LC en lugar de un filtro L se puede reducir la inductancia sin perder capacidad de filtrado. Actualmente los filtros LC son ampliamente utilizados, sin embargo su diseño es complejo y se necesita considerar muchas limitaciones [46]. En la referencia [45] se demuestra que incluso el filtro LCL necesita un valor de inductancia menor que el filtro LC para lograr el mismo efecto de filtrado, lo que le convierte en otra elección interesante de análisis. En definitiva, ante la posibilidad indeseada de tener que aumentar el valor de la inductancia del filtro L para lograr reducir los armónicos de la conmutación, lo que como se estudió en 2.3.4 supone una reducción significativa de la capacidad de potencia reactiva por parte del STATCOM, es preferible considerar el empleo de otras alternativas como el filtro LC o LCL.

5.3. Trabajos futuros

- Optimización del modelo implementando. Elaborar un estudio de las dimensiones de los condensadores y los IGBTs empleados, logrando la capacidad del STATCOM necesaria con el menor coste posible e implementar las mejoras planteadas en el punto anterior [5.2](#).
- Implementación del DSTATCOM. Completar el algoritmo de control para poder realizar las funciones añadidas a las dos estudiadas del STATCOM que realiza este dispositivo en sistema de distribución de energía, con la posibilidad de actuar como un filtro activo para los armónicos de la red y la capacidad de operar independientemente en cada fase. Para ello sería necesario un planteamiento del control distinto al expuesto en donde se operaría en un marco de referencia síncrono con armónicos (HSRF) [\[13\]](#).
- Justificación de un proyecto real. Estudiar un caso real de la red eléctrica en el que existe un fragmento del recorrido donde se producen exigentes condiciones del sistema o un elevado número de errores, dichos factores provocan que la calidad de energía esté en cuestión y se pueda requerir la implantación de un STATCOM. Una vez implementado un modelo cuyas simulaciones corroboren que ofrece la solución correcta a las contingencias más severas, elaborar un análisis económico real que justifique su inversión [\[50\]](#).
- Elaboración de un proyecto real en el laboratorio. Una vez cumplimentado los cálculos teóricos y simulaciones del modelo, elaborar un dispositivo real para lograr resultados experimentales reales que validen los planteamientos propuestos.
- Repercusión de posibles avances. Análisis de la inclusión de fuentes de energía en la etapa de continua (DC), lo que supondría la evolución del STATCOM, siendo capaz de lograr la combinación de potencia activa y reactiva. Un sistema de almacenamiento de energía aumentaría los modos de operación del STATCOM, proporcionándole mayor flexibilidad y eficiencia [\[51\]](#).

Capítulo 6

Presupuesto

En este capítulo se estima una aproximación de los costes que supondría el proyecto realizado desde el punto de vista empresarial. En el punto 6.1 se elabora el presupuesto personal de la realización del estudio “Estudio y Simulación de un STATCOM conectado a una red”. Mientras que en la sección 6.2 se ofrece un análisis de los factores a considerar a la hora de estudiar la inversión de dicho dispositivo.

6.1. Presupuesto personal.

A la hora de acometer el presupuesto de un trabajo, en primera instancia es necesario medir los costes directos e indirectos de dicha operación, para posteriormente buscar un equilibrio óptimo entre los beneficios que se quieren obtener y el precio final, el cual debe ser competitivo dentro del sector.

El presupuesto presentado en la Tabla 6.1 se inspira en algunos de los modelos ofrecidos en la referencia [52]. Los costes de los principales recursos y pagos legislativos a considerar se han estimado a raíz de consultas de experiencias reales y estimaciones. Se ha considerado como objeto de partida, la hipotética situación de comenzar a trabajar como autónomo elaborando un proyecto encargado por un cliente. Los principales gastos han sido distribuidos en los siguientes grupos:

1. Personal: En este punto se ha considerado el sueldo que se ha estimado justo del trabajo realizado. Como ingeniero novel que comienza a operar en el mundo corporativo, se ha buscado un sueldo aceptable y relativamente bajo para poder lograr un presupuesto menor que sea atractivo para conseguir la permanencia de un cliente nuevo. En este punto se considera la cuota de la Seguridad Social de un autónomo en sus inicios a raíz de la información ofrecida por el Ministerio de Empleo y Seguridad Social [53]:
 - Los primeros seis meses la cuota se corresponde a 50 €.
 - Los siguientes seis meses la cuota asciende a 133 €.

Se estima un precio medio de la cuota mensual en el primer año mediante la siguiente ecuación (6.1).

$$Coste\ mensual_{Autonomo} = \frac{50 \cdot 6 + 133 \cdot 6}{12} = 91,5 \text{ [€/mes]} \quad (6.1)$$

2. Costes operacionales: Este punto incluye los recursos informáticos necesarios para la elaboración de este estudio, desde los dispositivos de trabajo como el ordenador portátil hasta el pago de las licencias de los programas informáticos empleados. Atendiendo a la referencia [54] se obtiene los precios de las licencias de Matlab y Simulink sin profundizar en los paquetes complementarios, se estima un coste mensual aproximado de ambos mediante las expresiones (6.2) y (6.3).

$$Coste\ mensual_{Matlab} = \frac{2000}{12} = 166,67 \text{ [€/mes]} \quad (6.2)$$

$$Coste\ mensual_{Simulink} = \frac{3000}{12} = 250 \text{ [€/mes]} \quad (6.3)$$

Otro objeto de análisis son los costes indirectos tales como el pago de la hipoteca del crédito pedido para la compra de un local, que se utiliza como oficina y los gastos derivados de su utilización, como la comunidad, el agua y la luz.

3. Subcontratación: Muchas empresas requieren la necesidad de contratar servicios secundarios, que aunque están directamente relacionados con su actividad, no son la especialidad a la que se dedican y les resulta más rentable optar por la vía de la subcontratación. En el caso planteado ante el montaje de una pequeña empresa nueva, contratar una gestoría para encargarse del tedioso trabajo administrativo, es una situación lógica y común, por lo que se ha considerado en el presupuesto planteado.

Una vez calculado los coste mostrados en la Tabla 6.1, se elabora una factura como la mostrada en la Tabla 6.2, donde se incluye el 21 % del IVA mediante la expresión (6.4), obteniendo el importe final a cobrar por el servicio.

$$Coste\ Presupuestado = Coste_{Total} \cdot 1,21 \quad (6.4)$$

NOMBRE DEL PROYECTO:		Estudio y Simulación de un STATCOM.	
PERÍODO DEL PROYECTO:		9 meses	
Concepto	Coste mensual (€/mes)	Duración (meses)	Coste total (€)
1. Personal			
1.1 Salario	1000	9	9000
1.2 Autónomo	91.5	9	823.5
2. Costes operacionales			
2.1 Hardware			
2.1.2 Portatil	25	9	225
2.2 Software			
2.2.1 Licencia Matlab 2014	166.67	7	1166.69
2.2.2 Licencia Simulink 2014	250	7	1750
2.3 Otros costes			
2.3.1 Hipoteca del local	300	9	2700
2.3.2 Comunidad	80	9	720
2.3.3 Luz y agua	120	9	1080
2.3.4 Transporte	20	9	180
3. Subcontratación			
3.1 Gestoria	30	9	270
Coste Total:			17915.19
ELABORADO POR: López Merino, Jesús		FECHA: 15/08/2016	
REVISADO POR : Montilla D'Jesús, Miguel Eduardo		FECHA: 01/09/2016	

Tabla 6.1. Presupuesto personal del proyecto

NOMBRE DEL PROYECTO:	Estudio y Simulación de un STATCOM.
PERÍODO DEL PROYECTO:	9 meses
Concepto	Coste total (€)
1. Personal	9823.5
2. Costes operacionales	7821.69
3. Subcontratación	270
Coste total :	17915.19
Coste presupuestado :	21677.38

Tabla 6.2. Factura final.

6.2. Análisis económico de la inversión

El STATCOM ofrece entre sus principales aplicaciones regular la tensión del PCC y corregir el factor de potencia. Sin embargo, aunque la calidad de la energía queda ampliamente mejorada por su actuación, la generalización del STATCOM queda lastrada por la inversión de capital necesaria. Se ofrece un resumen de las principales premisas económicas que se atienden a la hora de elaborar un análisis de la inversión [50]. El objetivo final es extraer una conclusión fidedigna mediante el empleo de una herramienta de análisis económico ampliamente conocida, VAN (Valor actual neto). Dicho parámetro es el producto de los beneficios y costes relacionados con la implantación del propio STATCOM.

Un factor clave es la potencia del dispositivo, que determina su capacidad para cumplir la función fijada por el cliente y por consiguiente, su precio. Los principales beneficios de su operación han quedado remarcados en la sección 2.2.1, pero cabe destacar otros efectos secundarios, como reducir los costes laborales de errores producidos por el trabajo en condiciones desfavorables (intensidades elevadas) y producen pérdidas del valor de la producción, el gasto de reconstruir o reparar los materiales perdidos o el equipamiento dañado, además de los ingresos (oportunidades) perdidos por no cumplir el contrato.

Los principales factores a considerar en los beneficios son el cumplimiento de las siguientes funciones:

- Regular la tensión del punto de conexión, analizado en 4.1. En este apartado se incide en considerar la eficacia del STATCOM con los parámetros W_{ant} y W_{pos} . El beneficio del empleo del STATCOM se determina con la expresión (6.5) [50].

$$\Phi_{sag} = k_{sag} \cdot t_{int} \cdot (W_{ant} - W_{pos}) \cdot C_{cons} \quad (6.5)$$

Donde:

- Φ_{sag} : Beneficio debido a la mitigación del sag de tensión [€].
 - k_{sag} : Coste unitario por pérdidas [€/kWh].
 - C_{cons} : Capacidad del consumidor [kW]
 - t_{int} : Duración de la interrupción [h].
 - W_{ant}, W_{pos} : Factores adimensionales empleados para estimar la variación de magnitud antes y después de la mitigación.
- Corregir el factor de potencia en el PCC, analizado en 4.2. El beneficio de la reducción del factor de potencia queda expresado mediante las ecuaciones (6.6) y (6.7) [50].

$$\Phi_{PF} = k_{PF} \cdot Q_{com} \quad (6.6)$$

$$Q_{com} = P_L \left(\sqrt{\frac{1 - PF_{ant}^2}{PF_{ant}^2}} - \sqrt{\frac{1 - PF_{val}^2}{PF_{val}^2}} \right) \quad (6.7)$$

Donde:

- Φ_{PF} : Beneficio de corregir el factor de potencia [€].
- Q_{com} : Cantidad de potencia reactiva compensada [kVAr]
- P_L : Potencia activa de la carga [kW].
- PF_{ant} : Factor de potencia de la instalación anterior.
- PF_{val} : Mínimo factor de potencia aceptable.
- k_{PF} : Coste de un bajo factor de potencia [€/kWh].

Otro factor son las pérdidas energéticas evitadas por el STATCOM, con la suma de dichos parámetros se establecería los beneficios de su instalación. Desde el punto de vista de los gastos, se debe analizar la contratación del personal necesario, dicho gasto se analiza en un presupuesto similar al presentado en el punto 6.1, el importe inicial de la compra y en menor medida los gastos de mantenimiento y operación.

Los costes fijos de la inversión inicial del STATCOM pueden relacionarse exclusivamente con su capacidad de potencia reactiva [50], sin embargo como se ha estudiado en este proyecto dicha inversión se fundamenta en las dimensiones del condensador y los IGBTs, además de la configuración del convertidor que influye en el número de componentes empleados. Para determinar dicho precio se debe realizar un estudio del mercado, tras la definición de las condiciones de operación requeridas. Además se debe analizar los gastos de mantenimiento definidos en (6.8) [55].

$$C_{op} = \sum_{t=1}^{t_{vida}} C_{man} \cdot \left(\frac{100 + \lambda}{100} \right) \quad (6.8)$$

Donde:

- C_{op} : Costes operacional total [€].
- C_{man} : Costes anual de mantenimiento [€].
- λ : Porcentaje anual de incremento del coste de mantenimiento [%].
- t_{vida} : Ciclo de vida estimado para el STATCOM en condiciones estipuladas [años].

La teoría del análisis de los costes es mucho más compleja que el resumen ofrecido en este punto, debería ser considerado el valor tiempo del dinero, la necesidad de requerir prestamos para la inversión con sus correspondientes intereses, la legislación vigente que se debe cumplir y los costes de no llegar a los plazos. El sumatorio de todas las cuestiones comentadas acrecientan la cuantía final de la instalación. El VAN es el resultado de comparar costes y beneficios, siendo un parámetro fiable para aceptar o desechar la idea de un proyecto [56], el cual se define en la expresión (6.9).

$$VAN = -C_f + \sum_{t=1}^n \left(\frac{B_i - C_i}{1 + \frac{r}{100}} \right)^i \quad (6.9)$$

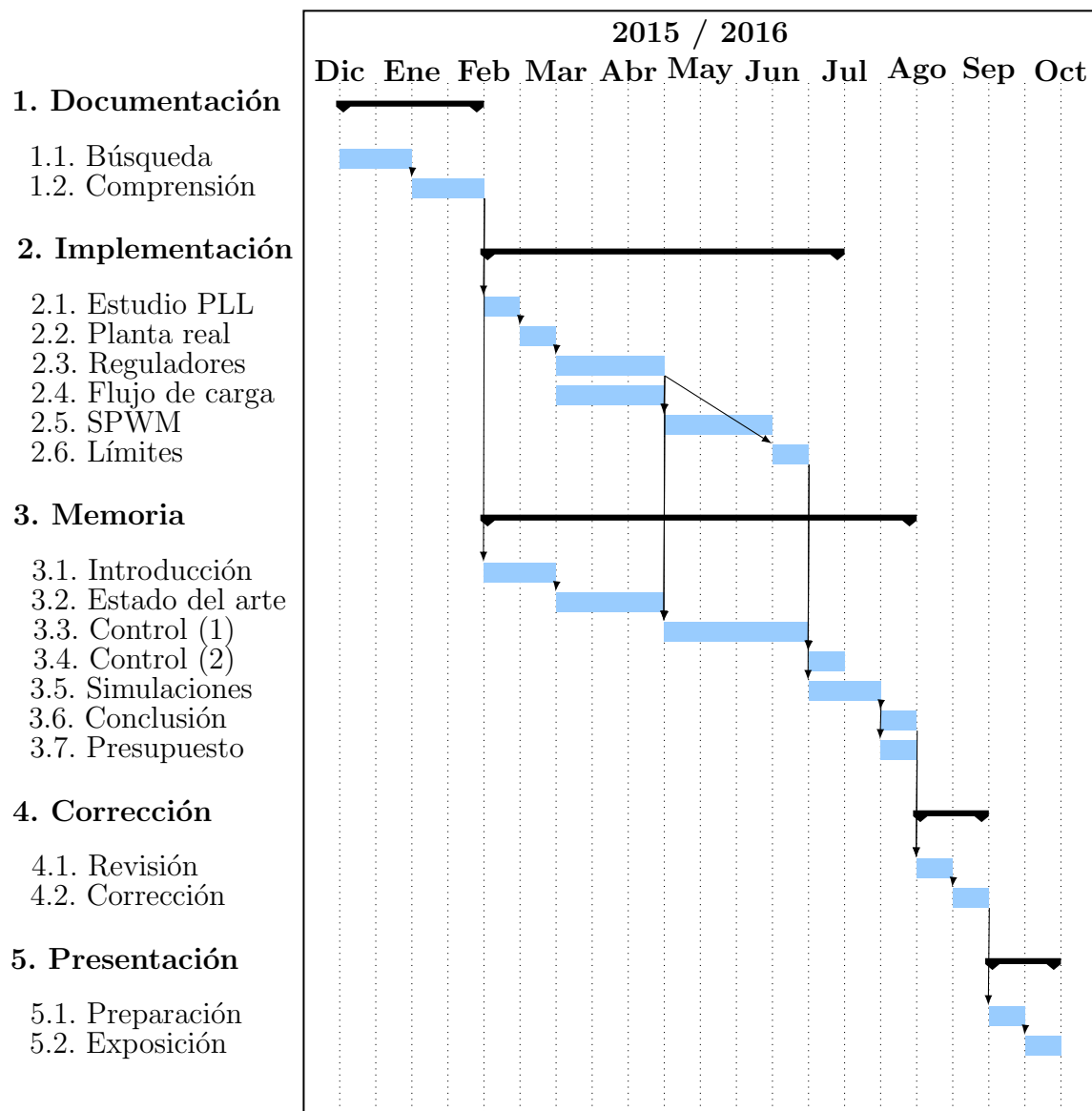
Donde:

- C_f : Costes fijos [€].
- B_i : Beneficios totales del año i [€].
- C_i : Costes totales del año i [€].
- r : Índice de rentabilidad.
- n : Periodo de análisis [años].

Del análisis presentado se puede extraer la conclusión de que una inversión de esta índole será rentable, en primera instancia si el punto de la distribución energética donde se acople el dispositivo presenta unas condiciones deplorables desde el punto de vista del consumidor, por una gran cantidad de incidencias que perjudican la calidad energética. Otro factor determinante, es elaborar un estudio del dimensionamiento del STATCOM necesario atendiendo a su capacidad, eficacia y vida útil.

Capítulo 7

Planificación del proyecto



Bibliografía

- [1] E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez y Cesar Angeles-Camacho. *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons, 2004.
- [2] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz y Bikash Pal. *Flexible AC transmission systems: modelling and control*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [3] Enrique Acha, Vassilios Agelidis, Olimpo Anaya y Timothy John Eastham Miller. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Elsevier, 2001.
- [4] Codra. Alstom Grid uses a SCADA system for its power compensators. <http://www.energy.siemens.com/mx/en/power-transmission/facts/static-var-compensator-plus/#content=References>.
- [5] B. Singh, R. Saha, A. Chandra y K. Al-Haddad. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *IET Power Electronics*, 2(4):297–324, July 2009.
- [6] NM Tabatabaei, S Abbasi, NS Boushehri y A Jafari. Overview of STATCOM technology. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, pages 23–28, 2015.
- [7] Timothy John Eastham Miller y Charles Concordia. *Reactive power control in electric systems*, volume 2. Wiley New York, 1982.
- [8] N. G. Hingorani. FACTS Technology - State of the Art, Current Challenges and the Future Prospects. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pages 1–4, June 2007.
- [9] ABB. SVC to stabilize a large 735 kv transmission system in Canada. <https://library.e.abb.com/public/b331443ac2f6b91ac1256fda003b4d00/A02-0106%20E%20LR.pdf>.
- [10] ABB. TCSC for stable transmission of surplus power from Eastern to Western India. https://library.e.abb.com/public/1e36fc1bf524064ec125787800258583/A02-0185%20E_Raipur_LR.pdf.
- [11] Aysen Arsoy, Yilu Liu, Shen Chen, Zhiping Yang, ML Crow y PF Ribeiro. Dynamic performance of a static synchronous compensator with energy storage. In *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, volume 2, pages 605–610. IEEE, 2001.

- [12] C. K. Sao, P. W. Lehn, M. R. Iravani y J. A. Martinez. A benchmark system for digital time-domain simulation of a pulse-width-modulated D-STATCOM. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(4):1113–1120, Oct 2002.
- [13] Farhad Shahnia, Sumedha Rajakaruna y Arindam Ghosh. *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*. Springer, 2015.
- [14] María Ángeles Martín Prats. *Nuevas técnicas de modulación vectorial para convertidores electrónicos de potencia multinivel*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2003.
- [15] Jih-Sheng Lai y Fang Zheng Peng. Multilevel converters-a new breed of power converters. *IEEE Transactions on industry applications*, 32(3):509–517, 1996.
- [16] Bingsen Wang y Jimmie J Cathey. DSP-controlled, space-vector PWM, current source converter for STATCOM application. *Electric Power Systems Research*, 67(2):123–131, 2003.
- [17] Saswato R Das. The sensible superconductor [magnesium diboride]. *IEEE Spectrum*, 39(7):34–37, 2002.
- [18] P Sanchis, Ó Alonso, A Guerrero y L Marroyo. IGBT, características y utilización. *MUNDO ELECTRONICO*, pages 80–80, 1999.
- [19] López Mesa Diana Jimena, Camacho Muñoz Guillermo Alberto, Díaz Chávez, Jaime Oscar y Gaviria López Carlos Alberto. Modulación PWM aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos AC., 2007.
- [20] Carlos Mancebo Durán. Control de motores eléctricos con baterías electroquímicas. Trabajo Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid., 2015.
- [21] A Schonung y H Stemmler. Static frequency changers with subharmonic control in conjunction with reversible variable speed ac drives. *Brown Boveri Rev*, 51(8/9):555–577, 1964.
- [22] Pedro Rodríguez Cortés. *Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [23] Joachim Holtz. Pulsewidth modulation for electronic power conversion. *Proceedings of the IEEE*, 82(8):1194–1214, 1994.
- [24] SL Capitaneanu, B de Fornel, M Fadel, J Faucher y A Almeida. Control-Graphical and algebraic synthesis for PWM methods. *EPE-European Power Electronics and Drives Journal*, 11(3):16–28, 2001.
- [25] Alfredo De la Barrera González, AA Arellano Sánchez, Indrid Reséndiz Maldonado y Marco A Javier Sánchez. Análisis de PWM sinusoidal (SPWM) utilizando Matlab para generar el código de conmutación digital. *IEEE ROC&C*, 2015.
- [26] Mónica Chinchilla Sánchez. *Control de un sistema de generación eólica de velocidad variable con generador síncrono multipolar de imanes permanentes acoplado a red*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2001.

- [27] Robert H Park. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48(3):716–727, 1929.
- [28] Eugenie Clark. A method for artificial insemination in viviparous fishes. *Science (New York, NY)*, 112(2920):722, 1950.
- [29] Joaquín Eloy-García Carrasco. *Control directo de potencia de convertidores electrónicos conectados a la red*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica,, 2007.
- [30] D. Dong, B. Wen, D. Boroyevich, P. Mattavelli y Y. Xue. Analysis of Phase-Locked Loop Low-Frequency Stability in Three-Phase Grid-Connected Power Converters Considering Impedance Interactions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(1):310–321, Jan 2015.
- [31] Yankui Zhang, Yan Zhang, Bei Wu y Jian Zhou. Power injection model of STATCOM with control and operating limit for power flow and voltage stability analysis. *Electric Power Systems Research*, 76(12):1003–1010, 2006.
- [32] Claudio A Canizares, Massimo Pozzi, Sandro Corsi y Edvina Uzunovic. STATCOM modeling for voltage and angle stability studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(6):431–441, 2003.
- [33] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, Takao Hirasu y Katsunori Taniguchi. Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(5):866–871, 1990.
- [34] John G Ziegler y Nathaniel B Nichols. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11), 1942.
- [35] Joseba Quevedo y Teresa Escobet. *Digital control: Past, present and future of PID control*. Elsevier Science Inc., 2000.
- [36] Yun Li, Kiam Heong Ang y G. C. Y. Chong. PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems*, 26(1):32–41, Feb 2006.
- [37] P Cominos y N Munro. PID controllers: recent tuning methods and design to specification. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 149(1):46–53, 2002.
- [38] Y Li, W Feng, XK Zhu, KC Tan, X Guan y KH Ang. PIDeasy and automated generation of optimal PID controllers. *Asia-Pacific Conference on Control & Measurement, 3 rd, Dunhuang, China*, pages 29–33, 1998.
- [39] Universidad Carlos III de Madrid. *Notas de la materia Control de Máquinas Eléctricas*, 2016.
- [40] Athanasios Papoulis. *Sistemas y circuitos: digitales y analógicos*. Marcombo, 1989.
- [41] Jeffrey W Umland y Mohammed Safiuddin. Magnitude and symmetric optimum criterion for the design of linear control systems: what is it and how does it compare with the others? *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(3):489–497, 1990.

- [42] A. Scottedward Hodel y C. E. Hall. Variable-structure PID control to prevent integrator windup. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(2):442–451, Apr 2001.
- [43] D Vrancic. *Design of anti-windup and bumpless transfer protection. Part II: PID controller tuning by multiple integration method*. Tesis Doctoral, PhD thesis, University of Ljubljana, J. Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, 1996.
- [44] Antonio Visioli. Modified anti-windup scheme for PID controllers. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 150(1):49–54, 2003.
- [45] Guopeng Zhao, Jinjun Liu y Minxiao Han. Design of input filters considering the stability of STATCOM systems. *Journal of Power Electronics*, 11(6):904–913, 2011.
- [46] Cunping Wang, Xianggen Yin, Minghao Wen, Jian Liu, Qing Xiong y Bin Zhang. Structure and parameters design of output LC filter in D-STATCOM. In *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [47] Math HJ Bollen, Irene YH Gu, Peter GV Axelberg y Emmanouil Styvaktakis. Classification of underlying causes of power quality disturbances: deterministic versus statistical methods. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2007(1):172–172, 2007.
- [48] Emmanouil Styvaktakis, Irene YH Gu y Math HJ Bollen. Classification of power system events: voltage dips. In *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, volume 2, pages 745–750. IEEE, 2000.
- [49] William E Brumsickle, Robert S Schneider, Glen A Luckjiff, Deepak M Divan y Mark F McGranaghan. Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(1):212–217, 2001.
- [50] Kittaya Somsai y Thanatchai Kulworawanichpong. Cost estimation for reactive power compensation in distribution power system by using D-STATCOM, 2013.
- [51] Zhiping Yang, Mariesa L Crow, Chen Shen y Lingli Zhang. The steady state characteristics of a StatCom with energy storage. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, volume 2, pages 669–674. IEEE, 2000.
- [52] Arturo Zuniga. Manual de presupuesto para proyectos. <http://es.slideshare.net/cpczuniga/manual-de-presupuesto-para-proyectos>.
- [53] Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Base de cotización. http://www.seg-social.es/Internet_1/Trabajadores/CotizacionRecaudaci10777/Regimenes/RegimenEspecialTrab10724/index.htm.
- [54] MathWorks. Precio de licencias individuales. <http://es.mathworks.com/pricing-licensing/index.html?prodcode=ML>.
- [55] TS Chung y Ge Shaoyun. A recursive lp-based approach for optimal capacitor allocation with cost-benefit consideration. *Electric Power Systems Research*, 39(2):129–136, 1996.

- [56] Richard Robinson, Uno Danielson y Martin Snaith. Road Maintenance Management-Concepts and Systems, 1998.

Apéndice

Apéndice A

Datos técnicos del sistema Benchmark analizado

Potencia base	$S_{base} = 10 \text{ kVA}$	
Tensión base	$V_{base} = 93,9 \text{ V}$	
Intensidad base	$I_{base} = 71 \text{ A}$	
Frecuencia fundamental	$f = 60 \text{ Hz}$	
Tensión de la fuente	$E_s = 93,9 \text{ V}$	1 p.u.
Inductancia de la fuente	$L_s = 0.145 \text{ mH}$	0.041 p.u.
Resistencia de la fuente	$R_s = 25 \text{ m}\Omega$	0.019 p.u.
Inductancia de filtrado	$L_f = 0,637 \text{ mH}$	0.18 p.u.
Resistencia de filtrado	$R_f = 0,15 \Omega$	0.11 p.u.
Frecuencia de conmutación	$f_{sw} = 1620 \text{ Hz}$	27 p.u.
Frecuencia de muestreo	$f_s = 3240 \text{ Hz}$	54 p.u.
Condensador de la etapa de continua	$C = 4.82 \text{ mF}$	0.414 p.u.
Tensión de continua	$V_{DC} = 230 \text{ V}$	1.41 p.u.

Apéndice B

Valores base

$V_{AC\ base}$	=	Valor máximo de la tensión de fase	$[V]$
S_{base}	=	Potencia nominal del generador	$[VA]$
f_{base}	=	Valor nominal de la frecuencia de alimentación	$[Hz]$
ω_{base}	=	$2\pi f_{base}$	$[rad/s, elec]$
$I_{AC\ base}$	=	$\frac{2}{3} S_{base}/V_{base}$	$[A]$
$Z_{AC\ base}$	=	$V_{AC\ base}/I_{AC\ base}$	$[\Omega]$
L_{base}	=	$Z_{AC\ base} \omega_{base}$	$[H]$
$V_{DC\ base}$	=	$\sqrt{3} V_{AC\ base}$	$[V]$
$I_{DC\ base}$	=	$\frac{\sqrt{3}}{2} I_{AC\ base}$	$[A]$
$Z_{DC\ base}$	=	$2 Z_{AC\ base}$	$[\Omega]$

Apéndice C

Transformación al sistema de referencia d-q-o

El estudio del concepto de la transformación de las variables al sistema de referencia d-q-o, se fundamenta en la información proporcionada en la tesis [1]. Los conceptos de potencia activa, reactiva y aparente se remontan a los años 40, pero solo presentan validez para las tensiones o corrientes, cuando se trataban de sistemas equilibrados de carácter sinusoidal. No obstante, los desarrollos tecnológicos acaecidos durante todo el siglo XX, provocan un nuevo paradigma que requiere un cambio de mentalidad, principalmente por:

- Los equipos que emplean electrónica de potencia actúan como cargas no lineales, generando constantemente armónicos en su actuación. Su significativa presencia en el ámbito industrial y doméstico, equivale a una enorme fuente de perturbaciones para el sistema en general, favoreciendo la pérdida de su carácter sinusoidal.
- La instrumentación tradicional empleada en aquella época no estaba preparada para medir ondas con características alejadas de las frecuencias fundamentales de 50 o 60 Hz [2]. Dicha situación forzó al desarrollo de nuevos equipos con mayor exactitud a la hora de medir magnitudes eléctricas, con nuevos algoritmos matemáticos.
- Todo proyecto debía presentar las consecuencias del efecto provocado por dichas cargas no lineales, en términos financieros.

A partir de la definición de potencia en el campo temporal, Akagi formuló una teoría de potencias instantáneas (p-q), con consenso general en la comunidad de expertos de corrientes en sistemas trifásicos, a mediados de los 80 [3] [4]. Su contribución supuso la definición de la potencia imaginaria instantánea, la cual explica con claridad y significado físico el intercambio instantáneo de energía entre fases de un sistema trifásico, pero al mismo tiempo contenía restricciones y esto llevó al desarrollo de nuevas teorías.

En este estudio se ha empleado la transformaciones de Clarke [5] y de Park [6], para lograr que las intensidades y tensiones queden definidas en un sistema sencillo estrechamente relacionado con el sistema trifásico real, capaz de manifestar con precisión las perturbaciones producidas como producto de distorsiones o desequilibrios. Además de ofrecer un significado físico fácilmente comprensible.

Un aspecto fundamental para el desarrollo teórico del tema en cuestión son los métodos de descomposición de la corriente y la teoría de potencia. Los enfoques dominantes fueron los de Fryze [7] y Budeanu [8], a finales de los años 20. La caracterización de la potencia en el dominio de la frecuencia fue planteada por Budenau, quien definió a raíz de la interacción de la tensión e intensidad, tres componentes, la activa P, la reactiva Q y por último, una potencia de distorsión D. Fryze empleo dicha representación para el dominio temporal, como queda ampliamente expuesto en la referencia [1].

Respecto al enfoque vectorial del sistema trifásico fue Fortescue [9] quien en 1918 introdujo el concepto de las componentes simétricas. Dicho método posibilitó estudiar sistemas trifásicos incluso en un estado de desequilibrio, con un análisis matemático y físico de los fenómenos producidos en dichas condiciones.

Lyon [10] planteó la transformación de las variables, considerando el ejemplo de la tensión, obteniendo la siguiente expresión:

$$\vec{V}_{+-0} = [T_{+-0}] \vec{V}_{abc} \quad (C.1)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{v}^+ \\ \vec{v}^- \\ \vec{v}^0 \end{bmatrix} = [T_{+-0}] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

Donde:

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

Se considera [1]:

- v_a, v_b y v_c representan las variables instantáneas de las tres fases.
- α es el operador de Fortescue.
- La norma de la matriz de transformación $[T_{+-0}]$ es igual a uno.
- La variable instantánea v^0 es siempre real.
- Las variables instantáneas \vec{v}^+ y \vec{v}^- y pueden representarse como vectores espaciales cuyas trayectorias en el plano complejo dependen de funciones temporales v_a, v_b y v_c .
- Las variables \vec{v}^+, \vec{v}^- y v^0 no deben confundirse con los vectores instantáneos de secuencia positiva, negativa y homopolar.

Clarke [5] empleo elementos reales en lugar de complejos en su matriz de transformación, expreso dicho sistema referencia con la nomenclatura $\alpha - \beta - \gamma$, como queda evidenciado en las fórmula (C.3)-(C.6).

$$\vec{V}_{\alpha\beta\gamma} = [T_{\alpha\beta\gamma}] \vec{V}_{abc} \quad (\text{C.3})$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}\Re(\vec{v}^{++}) \\ \sqrt{2}\Im(\vec{v}^{++}) \\ v^0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

$$[T_{\alpha\beta\gamma}] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

$$[T_{\alpha\beta\gamma}]^{-1} = [T_{\alpha\beta\gamma}]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.6})$$

Park [6] extendió la transformación de Clarke, para expresar las variables de fase sobre unos ejes de referencia rotativos (d-q) que giraban a velocidad w , y ocupaban la posición $\theta = wt$ a lo largo del tiempo. La transformación propuesta por Park se resume en las expresiones (C.7)-(C.10):

$$\vec{V}_{dqz} = [T_\theta] \vec{V}_{abc} = [T_{dqz}] [T_{\alpha\beta\gamma}] \vec{V}_{abc} \quad (\text{C.7})$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_z \end{bmatrix} = [T_{dqz}] [T_{\alpha\beta\gamma}] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

$$[T_{dqz}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.9})$$

$$[T_{dqz}]^{-1} = [T_{dqz}]^T$$

$$[T_\theta] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

$$[T_\theta]^{-1} = [T_\theta]^T$$

En la Figura C.1 se observan las componentes del vector \vec{V} sobre el sistema de referencia rotativo d-q-z. Esta concepción del sistema trifásico resulta de gran utilidad en la definición de potencias instantáneas. Las teorías posteriores más significativas que contribuyeron al desarrollo del enfoque vectorial en la caracterización de intensidades y potencias, no serán remarcadas en este proyecto, pero son analizadas en la referencia [1].

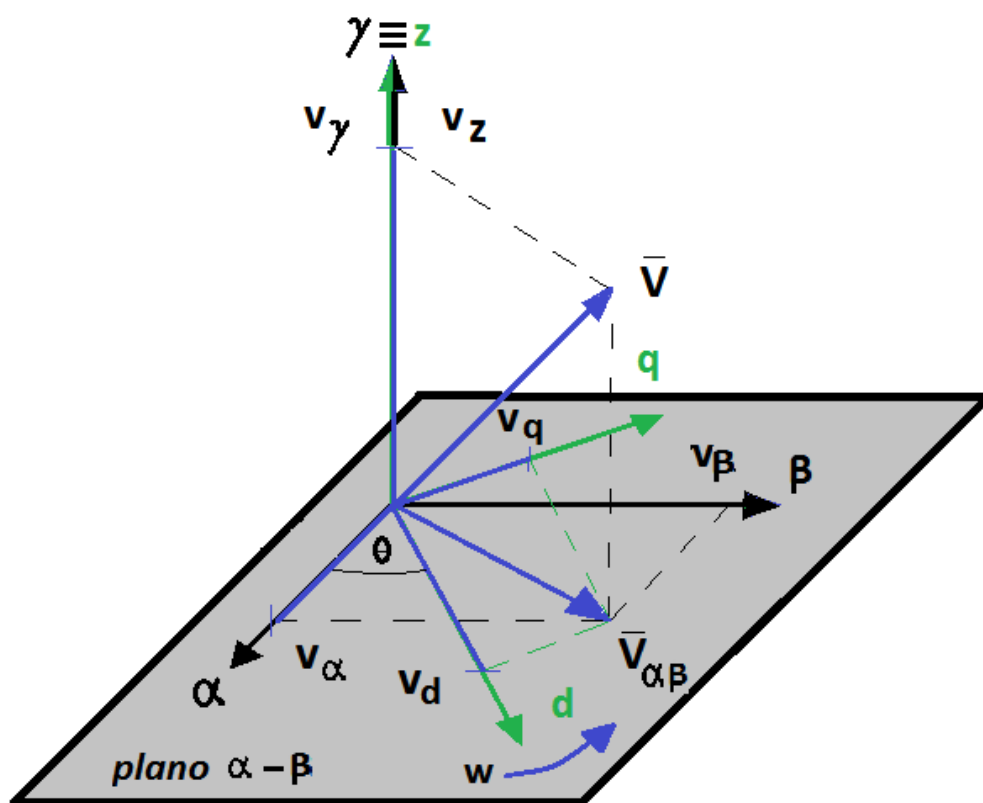


Figura C.1. Sistema de coordenadas α - β - γ y d-q-z [1]

Bibliografía

- [1] Pedro Rodríguez Cortés. *Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [2] PS Filipski, Y Baghzouz y MD Cox. Discussion of power definitions contained in the IEEE dictionary. *IEEE transactions on Power Delivery*, 9(3):1237–1244, 1994.
- [3] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, Koetsu Fujita y Akira Nabae. Generalized theory of instantaneous reactive power and its application. *Electrical engineering in Japan*, 103(4):58–66, 1983.
- [4] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa y Akira Nabae. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications*, pages 625–630, 1984.
- [5] Eugenie Clark. A method for artificial insemination in viviparous fishes. *Science (New York, NY)*, 112(2920):722, 1950.
- [6] Robert H Park. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48(3):716–727, 1929.
- [7] S Fryze. Active, reactive, and apparent power in non-sinusoidal systems. *Przeglad Elektrot*, 7:193–203, 1931.
- [8] CI Budeanu. Reactive and fictitious powers. *Rumanian National Institute*, 1927.
- [9] Charles L Fortescue. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 37(2):1027–1140, 1918.
- [10] Carlos Lyon. Furniture, June 24 1930. US Patent 1,765,766.

Apéndice D

Lazo de seguimiento de fase, PLL

El PLL es una técnica empleada para lograr la sincronización del control con la frecuencia fundamental de la planta. Para cumplir dicha finalidad se emplea el vector de la tensión, cuyo ángulo de fase contiene información imprescindible, destacando los sistemas que emplean electrónica de potencia. No obstante, existe otros factores determinantes tales como las dificultades y problemas originados en el acoplamiento entre la actuación del PLL y la impedancia de la carga [1].

En términos generales la detección de la secuencia positiva de la tensión es una cuestión crucial, por ejemplo en sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna (FACTS) [2]. Dicha función en definitiva posibilita sincronizar variables de salida de los convertidores [3] y calcular el flujo de potencia reactiva y activa [4].

Existen diferentes enfoques para la detección del módulo y la fase de la componente de la secuencia positiva en la tensión de red. La elección del método empleado dependerá de la capacidad y precisión a la hora de determinar características tales como el ángulo de fase, la frecuencia y la amplitud, en situaciones donde la red sufre desequilibrios por cargas, fallas o desbalanceos.

Soluciones tales como obtener el módulo y fase de las mismas mediante detectores de valor de pico y de paso por cero [5], son insuficientes debido a que solo se detecta la tensión de la red una vez cada medio ciclo, provocando un retardo de respuesta del sistema, además que la presencia de armónicos o los desequilibrios de las tensiones de red generan mediciones erróneas. Dicho método funcionaría idealmente si fuera un sistema con un conjunto de sinusoides perfectas y equilibradas.

Estas circunstancias convierten como solución ideal el empleo de un lazo de enganche de fase (PLL- Phase Locked Loop), el cual podría definirse como un sistema digital compuesto por tres elementos principales [6], como se evidencia en la representación esquemática de la Figura D.1:

- Detector de fase (PD). Se establece la diferencia entre la referencia y la salida.
- Bucle de filtrado (LF).
- Oscilador controlado digitalmente con una señal ya sincronizada con la entrada.

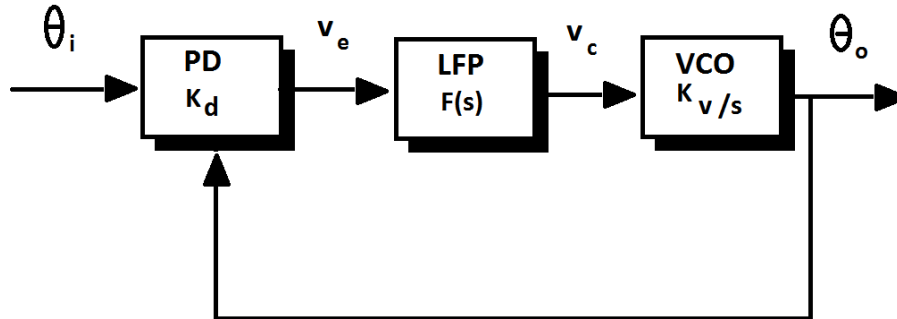


Figura D.1. Modelo esquemático de un PLL [6]

Generalmente, las distintas estructuras disponibles del PLL se diferencian mayormente por la implementación del PD. Los factores más relevantes para alcanzar el comportamiento u operación correcta de la estructura PLL son [7]:

- La estabilidad del PLL, buscando una estructura robusta capaz de ofrecer respuestas idóneas incluso en las situaciones más adversas. Una forma de lograrlo es estableciendo la distancia correcta entre los polos del bucle cerrado.
- El comportamiento del PLL ante componentes con distorsiones, logrando la capacidad de rechazo adecuada ante las perturbaciones. Es importante el destino de la aplicación, puesto que sirve como referencia para conocer aproximadamente la distorsión presente en vectores como el de la tensión.

El SRF-PLL conduce a buenos resultados en términos generales, sin embargo para sistemas donde se debe hacer frente armónicos relevantes en la tensión de red, dicha técnica puede presentar un error permanente. Una alternativa empleada para solucionar dicha situación es la de separar las secuencias positiva y negativa de las tensiones y retroalimentar solo la positiva [8]. Otra técnica utilizadas para hacer frente a armónicos de tensión de orden elevado es la de reducir el ancho de banda del SRF-PLL para lograr atenuar dichos armónicos [2], pero dicha solución presenta ciertos inconvenientes que se traducen en una actuación deficiente con un error constante, cuando se produce desequilibrios o transitorios en las tensiones de frecuencia fundamental [8] [1].

Además de que el comportamiento de los PLLs lineales con estructuras más sencillas en sistemas de baja frecuencia como redes débiles o microrredes, donde existen impedancias de distinta índole o cargas no lineales, no es el más efectivo o adecuado, debido a que el propio PLL adquiere un carácter no lineal. El control de los sistemas bajo estas circunstancias ofrece una respuesta errónea, como se demuestra en diversos estudios [8] [9].

En el caso de necesitarse un compartimiento óptimo bajo dichas circunstancias, donde el SRF-PLL presenta un error constante, se puede emplear una topología que aumente la exactitud de detección de fase, un ejemplo es el DSRF-PLL [2].

Bibliografía

- [1] D. Dong, B. Wen, D. Boroyevich, P. Mattavelli y Y. Xue. Analysis of Phase-Locked Loop Low-Frequency Stability in Three-Phase Grid-Connected Power Converters Considering Impedance Interactions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(1):310–321, Jan 2015.
- [2] Pedro Rodríguez Cortés. *Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [3] Dragan Jovcic. Phase locked loop system for FACTS. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(3):1116–1124, 2003.
- [4] John Godsk Nielsen, Michael Newman, Hans Nielsen y Frede Blaabjerg. Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level. *IEEE Transactions on power electronics*, 19(3):806–813, 2004.
- [5] Floyd M Gardner. *Phaselock techniques*. John Wiley & Sons, 2005.
- [6] Guan-Chyun Hsieh y James C Hung. Phase-locked loop techniques. A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(6):609–615, 1996.
- [7] L. N. Arruda, S. M. Silva y B. J. C. Filho. PLL structures for utility connected systems. In *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, volume 4, pages 2655–2660 vol.4, Sept 2001.
- [8] Sang-Joon Lee, Jun-Koo Kang y Seung-Ki Sul. A new phase detecting method for power conversion systems considering distorted conditions in power system. In *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, volume 4, pages 2167–2172. IEEE, 1999.
- [9] Juan C Vasquez, Josep M Guerrero, Alvaro Luna, Pedro Rodríguez y Remus Teodorescu. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(10):4088–4096, 2009.